La lettura della natura

Formalismo fisico, comprensione scientifica e intelligenza artificiale

Silvano Salvador

Introduzione

I.1 — Tesi centrale

La comprensione fisica è **lettura della natura**: un processo cognitivo attraverso cui un agente situato costruisce e abita un modello fisicamente orientato del mondo — un modello che ha carattere spaziale, dinamico, causale e analogico, che precede il formalismo matematico e lo orienta, che permane come struttura di orientamento anche dopo che il formalismo è costruito, e che non si riduce alla capacità di manipolarlo correttamente, nemmeno quando quella manipolazione produce previsioni di precisione arbitraria.

L'aggettivo «fisicamente abitato» merita subito una precisazione. Non si intende un'immagine intuitiva nel senso ordinario — una fotografia mentale del sistema. Si intende qualcosa di strutturalmente più ricco: un modello cognitivo che include la percezione di strutture fisiche (il fisico *vede* lo spazio delle fasi, *sente* dove il flusso hamiltoniano porta), la simulazione causale (il fisico anticipa il comportamento del sistema prima di calcolarlo), la costruzione di

analogie strutturali tra domini diversi, e il sapere tacito che orienta la ricerca prima che la domanda sia formalmente posta. Einstein lo chiamava *Einfühlung* — empatia fisica con il sistema — e ne faceva il motore della scoperta che precede la derivazione.

La tesi si distingue in modo preciso dalla tesi speculare delle due monografie precedenti di questa serie. Nella prima monografia (*La navigazione del senso*), la macchina supera la prestazione umana senza possedere la struttura di significato che l'esperto esercita — la crisi prestazionale rivela una struttura cognitiva. Nella seconda (*La visione e la dimostrazione*), il formalismo è *incompleto* nel senso di Gödel — la verità eccede la dimostrabilità — e la comprensione umana vede oltre il sistema formale. Qui la struttura è radicalmente diversa: il formalismo è *completo* nel senso predittivo, e la comprensione rimane aperta non per incompletezza del sistema ma per eccedenza del mondo fisico rispetto a qualsiasi descrizione che non lo abiti. Questa è la forma più acuta della dissociazione tra formalismo e comprensione, perché il problema non è che il formalismo sia insufficiente — è che la sua completezza non implica la comprensione.

La tesi ha un doppio fronte. Sul fronte della fisica: la storia del rapporto tra intuizione fisica e formalismo matematico mostra che la comprensione fisicamente abitata è stata il motore della scoperta attraverso tutta la storia della fisica, e la meccanica quantistica è il punto in cui questo motore ha incontrato la sua resistenza più radicale — non contingente ma strutturale. Sul fronte dell'intelligenza artificiale: i sistemi artificiali applicati alla fisica hanno raggiunto la completezza predittiva senza acquisire la lettura della natura, il che non è un difetto tecnico dell'architettura ma una differenza strutturale tra il tipo di agente che comprende fisicamente e il tipo di sistema che elabora rappresentazioni numeriche. I due fronti si illuminano a vicenda: il problema dell'IA rende visibile una struttura cognitiva che la fisica aveva lasciato implicita; la storia della fisica fornisce la misura della struttura che all'IA manca.

I.2 — La domanda generatrice

Cosa rivela la storia del rapporto tra formalismo matematico e intuizione fisica sulla struttura della comprensione scientifica, e cosa muta — per la mente e per la pratica — quando sistemi artificiali scoprono leggi naturali e risolvono problemi fisici senza abitare il mondo che quelle leggi descrivono?

La domanda ha due parti che si implicano a vicenda. La prima parte è storica e cognitiva: la storia della fisica non è solo la storia dei formalismi costruiti e delle leggi scoperte, ma la storia di un rapporto mutevole — a volte di armonia, a volte di tensione radicale — tra la capacità di calcolo formale e la capacità di comprensione fisica. Capire come questo rapporto si è trasformato, a quali strutture cognitive corrisponde nelle menti dei fisici, e perché la meccanica quantistica lo ha spinto alla sua frattura più profonda, è la metà del percorso.

La seconda parte è contemporanea e urgente. I sistemi di intelligenza artificiale applicati alla fisica producono previsioni di straordinaria accuratezza: AlphaFold2 risolve il problema della struttura proteica con precisione cristallografica per 200 milioni di proteine in tempi che la cristallografia tradizionale non raggiungerebbe in secoli; i sistemi di scoperta simbolica come AI Feynman di Udrescu e Tegmark (2020) riscoprono leggi fisiche dai dati sperimentali senza alcuna conoscenza pregressa della fisica; FermiNet di Pfau, Spencer et al. (2020) risolve l'equazione di Schrödinger a molti corpi con accuratezza variazionale superiore ai metodi quantistici tradizionali. La domanda su cosa manchi in queste prestazioni è una domanda filosoficamente precisa, non un lamento sul carattere dell'intelligenza artificiale: ha una risposta tecnica che richiede la costruzione di una struttura concettuale adeguata.

Le due parti si connettono attraverso la meccanica quantistica in modo non accidentale. Il dominio in cui il formalismo è più completo e la comprensione più aperta è anche il dominio in cui i sistemi artificiali mostrano la dissociazione più nitida tra prestazione predittiva e comprensione fisica — perché la struttura del formalismo quantistico rende la distanza tra calcolo e comprensione misurabile

con precisione. La meccanica quantistica non è il campo di applicazione dell'IA più spettacolare: è il dominio in cui la struttura del problema è più chiara, in cui le alternative interpretative sono enumerate e formalmente precise, e in cui la distinzione tra ciò che il sistema calcola e ciò che il fisico abita si manifesta nella sua forma più acuta.

Una chiarificazione metodologica è necessaria. La domanda non intende stabilire se i sistemi artificiali *capiscono* o meno la fisica in senso binario: questa formulazione è troppo grezza per produrre qualcosa di interessante. Intende costruire una caratterizzazione strutturale di cosa è la comprensione fisica e in quale misura precisa essa è presente o assente nei sistemi artificiali e nei fisici esperti — una caratterizzazione abbastanza precisa da essere falsificabile nei suoi dettagli, anche se non in senso empirico standard.

I.3 — I tre pilastri convergenti

La tesi centrale si sostiene su tre pilastri che percorrono registri disciplinari distinti e convergono sull'argomento principale.

Primo pilastro (*formalismo completo, comprensione aperta*): il formalismo della meccanica quantistica è predittivamente completo nel senso più radicale — dodici cifre decimali di accordo sperimentale nell'elettrodinamica quantistica — e tuttavia la comprensione fisica di ciò che descrive rimane strutturalmente aperta. Le interpretazioni della meccanica quantistica — Copenaghen, molti mondi, Bohm, GRW, QBism, Rovelli — producono le stesse previsioni per qualsiasi esperimento possibile: nessun test sperimentale può scegliere tra esse. La distanza tra completezza predittiva e irresolvibilità interpretativa è la misura esatta della lettura della natura come problema. Questo pilastro è costruito nel Blocco I (formalismo) e nel Blocco IV (interpretazioni).

Secondo pilastro (*struttura cognitiva dell'expertise fisica*): la psicologia cognitiva dell'expertise fisica documenta che i fisici esperti costruiscono rappresentazioni percettive, causali e analogiche del

dominio fisico che precedono il formalismo e lo orientano — strutture cognitive che non si derivano dalle equazioni ma le rendono possibili. Esperimenti mentali, diagrammi di Feynman, sapere tacito, dissociazioni documentate tra prestazione formale e comprensione fisica: il Blocco II traccia la fenomenologia della mente del fisico come agente cognitivo situato. Il Blocco III ricostruisce come questa struttura cognitiva si è trasformata storicamente nel rapporto tra intuizione fisica e formalismo matematico — dalla meccanica newtoniana all'elettromagnetismo alla crisi degli anni Venti.

Terzo pilastro (*dissociazione strutturale nei sistemi artificiali*): i sistemi di intelligenza artificiale applicati alla fisica producono previsioni fisicamente corrette senza acquisire nessuna delle strutture cognitive documentate nel secondo pilastro; e questa dissociazione non è contingente ma strutturale. AlphaFold risolve il ripiegamento proteico senza abitare la fisica del funnel energetico. I sistemi di scoperta simbolica come AI Feynman di Udrescu e Tegmark estraggono relazioni funzionali corrette dai dati senza costruire una rappresentazione causale del mondo fisico da cui quelle relazioni derivano. Questo pilastro è costruito nel Blocco V.

Il Blocco VI raccoglie i tre pilastri e li porta a convergenza verso una proposta epistemologica positiva: la lettura della natura come struttura cognitiva caratterizzata da quattro componenti — percettiva, causale, strutturale, ontologica — e come terza articolazione di una capacità che la formalizzazione completa non cattura, accanto alla navigazione di significato (giochi) e alla visione di struttura (matematica).

I.4 — Perché la fisica quantistica, e non altri domini

La scelta della meccanica quantistica come caso di test privilegiato non è arbitraria né dettata dalla sola prominenza culturale del dominio. Esistono ragioni strutturali precise che la distinguono dai domini alternativi — la fisica statistica, la relatività generale, la termodinamica — e che ne fanno il laboratorio più acuto per la tesi di

questa monografia. Conviene esporle sistematicamente, perché orientano la lettura dell'intera opera.

1. Completezza predittiva senza precedenti. La meccanica quantistica — nella sua versione più sviluppata, l'elettrodinamica quantistica — ha raggiunto un accordo tra previsioni teoriche e misurazioni sperimentali senza eguali nella storia della fisica. Il momento magnetico anomalo dell'elettrone è calcolato e misurato con una concordanza di dodici cifre decimali: la differenza tra valore teorico e valore sperimentale è inferiore a 10^{-12}. Nessun'altra teoria fisica, nessun altro dominio della conoscenza umana ha mai raggiunto questo livello di accordo tra previsione e misura. Questa completezza predittiva è filosoficamente cruciale: rende impossibile giustificare l'apertura interpretativa come conseguenza di un'imperfezione del formalismo. Il formalismo non è imperfetto. Il problema non è nel calcolo.

2. Proliferazione di interpretazioni empiricamente indistinguibili. A differenza di altri domini della fisica, la meccanica quantistica ha prodotto una proliferazione di interpretazioni — Copenaghen, molti mondi, meccanica di Bohm, teorie del collasso oggettivo GRW/CSL, QBism, interpretazione relazionale di Rovelli — che producono, per definizione, le stesse previsioni per qualsiasi esperimento possibile. Non si tratta di teorie in competizione che attendono una discriminazione sperimentale: si tratta di risposte diverse alla domanda su cosa il formalismo descriva — risposte che nessun esperimento futuro potrà scegliere per via puramente empirica. Questo non ha analogo nella fisica statistica (dove le interpretazioni divergono su questioni risolvibili in linea di principio) né nella relatività generale (dove il dibattito ontologico è attivo ma meno strutturalmente radicale).

3. Dissociazione massima tra IA e comprensione. I sistemi artificiali che lavorano in domini fisici diversi mostrano gradi diversi di dissociazione tra prestazione computazionale e struttura cognitiva. Un programma di simulazione della meccanica del continuo — per esempio la modellizzazione della turbolenza fluida — sfrutta strutture matematiche (equazioni differenziali alle derivate parziali,

metodi agli elementi finiti) che sono, almeno localmente, visualizzabili e concettualizzabili. Un fisico umano e un algoritmo di simulazione lavorano, in questi contesti, su rappresentazioni parzialmente condivise. In meccanica quantistica, invece, la struttura dello spazio degli stati — vettori in spazi di Hilbert di dimensione infinita su C, non localizzabili, non visualizzabili — è radicalmente inabitabile per l'intuizione fisica classica. La dissociazione non è parziale: è totale. Questa radicalità rende il dominio il banco di prova più discriminante per la tesi della lettura della natura.

4. Perché non la fisica statistica. La meccanica statistica affronta il problema del rapporto tra descrizione microscopica e proprietà macroscopiche: entropia, temperatura, pressione come proprietà emergenti da distribuzioni di stati microscopici. Le questioni interpretative sono reali (il problema del fondamento della freccia del tempo, l'interpretazione soggettiva vs. oggettiva della probabilità statistica) ma non raggiungono la stessa profondità strutturale. La fisica statistica ha un'ontologia microscopica abbastanza chiara — particelle classiche o quantistiche che si comportano secondo leggi note — e il problema è la derivazione delle proprietà macroscopiche da questa ontologia. Non c'è nulla di paragonabile al trilemma irriducibile del problema della misura.

5. Perché non la relatività generale. La relatività generale è il candidato più serio come dominio alternativo: anch'essa produce risultati sorprendenti (curvatura dello spazio-tempo, onde gravitazionali, buchi neri) che resistono all'intuizione, e il problema della quantizzazione della gravità è aperto. Ma la relatività generale è una teoria classica — la cui struttura è, almeno in linea di principio, geometricamente visualizzabile. Le varietà riemanniane, i tensori, la curvatura: sono oggetti che un fisico può disegnare, anche approssimativamente, su carta. La difficoltà interpretativa è alta, ma non raggiunge la frattura tra formalismo e comprensione che la meccanica quantistica documenta nel modo più netto.

6. Perché non la termodinamica. La termodinamica è invece troppo distante: il suo formalismo è parzialmente intuitivo (calore, lavoro, entropia hanno correlati fenomenologici accessibili), e l'IA ha trovato

applicazioni produttive nei problemi termodinamici senza che la dissociazione prestazione/comprensione raggiunga la nitidezza richiesta per l'argomento di questa monografia.

La meccanica quantistica occupa, in questo spazio di domini possibili, la posizione unica di un formalismo massimamente completo, massimamente non intuitivo, massimamente resistente alla comprensione fisica — e massimamente discriminante tra il calcolo che funziona e la lettura che rimane aperta.

I.5 — Premesse epistemologiche

L'opera attraversa tre discipline — fisica teorica, psicologia cognitiva, filosofia della fisica — ciascuna delle quali apporta un tipo distinto di contributo alla tesi. Non si tratta di un'interdisciplinarità decorativa: le tre discipline sono necessarie a costruire l'argomento, e nessuna è riducibile alle altre due. È utile rendere esplicite le assunzioni metodologiche implicite nell'architettura dell'opera prima che il lettore vi entri.

La fisica teorica fornisce il materiale che viene analizzato, non la cornice interpretativa. Il formalismo della meccanica quantistica — spazi di Hilbert, operatori hermitiani, equazione di Schrödinger, regola di Born, problema della misura — è l'oggetto dell'analisi. I risultati tecnici non sono sfondo decorativo: sono argomenti. La struttura della complessità computazionale (QMA-completezza del problema Local Hamiltonian) non è un dettaglio tecnico ma una premessa necessaria per valutare i limiti strutturali dell'IA applicata alla fisica. L'opera non presuppone che il lettore conosca già questo formalismo in profondità — il Blocco I costruisce le fondamenta necessarie — ma presuppone la disponibilità a seguire argomenti in cui la struttura matematica è parte costitutiva del significato, non una traduzione formale di una tesi già accessibile in termini intuitivi.

La psicologia cognitiva dell'expertise fisica è utilizzata come fonte di evidenza empirica con rilevanza normativa. Questa scelta metodologica merita un chiarimento, perché non è ovvia. La

psicologia cognitiva è una scienza descrittiva: documenta come i fisici esperti pensano, quali rappresentazioni costruiscono, come categorizzano i problemi. In che senso questa evidenza descrittiva ha rilevanza *normativa* per la filosofia della fisica? L'argomento è il seguente: se si intende sostenere che la comprensione fisica ha una struttura cognitiva specifica — non riducibile alla produzione di previsioni corrette — si ha bisogno di evidenza sulla struttura di quella comprensione. La psicologia cognitiva dell'expertise è l'unica fonte sistematica di tale evidenza. Non si tratta di dedurre norme dal fatto (la fallacia naturalistica), ma di vincolare l'analisi filosofica all'evidenza empirica disponibile: una proposta su cosa sia la comprensione fisica che contraddice sistematicamente la struttura documentata della cognizione fisico-esperta non è una proposta filosofica rigorosa, ma una proposta empiricamente disancorata. La psicologia cognitiva pone vincoli; la filosofia interpreta e articola.

La filosofia della fisica è il registro in cui le domande centrali dell'opera vengono formulate, e in cui le risposte vengono valutate. La distinzione tra completezza predittiva e comprensione interpretativa, il problema del realismo scientifico rispetto alla meccanica quantistica, la struttura del problema della misura come problema concettuale irriducibile: sono questioni filosofiche, nel senso preciso che non si risolvono con esperimenti e non si evaporano con calcoli più precisi. L'opera si inscrive nella tradizione della filosofia della fisica analitica — la tradizione che ha prodotto Maudlin (2007), Albert (1992), Wallace (2012) — e ne condivide l'impegno alla precisione concettuale e all'uso rigoroso del formalismo come strumento di argomento. Non condivide, invece, l'orientamento prevalentemente interno a quel dibattito: la novità metodologica di questa monografia consiste nel portare la psicologia cognitiva e l'epistemologia dell'IA dentro un problema che la filosofia della fisica ha trattato fino ad oggi prevalentemente come questione di ontologia e struttura del formalismo.

Una quarta assunzione metodologica, trasversale alle tre discipline, riguarda il ruolo della **storia della scienza**. La storia del rapporto tra intuizione fisica e formalismo matematico — da Newton a Maxwell,

da Heisenberg a Schrödinger — è usata in questa opera in modo argomentativo, non illustrativo. Non si racconta la storia per rendere il testo più leggibile o per fornire esempi pittoreschi: si usa la storia per mostrare la struttura di un problema che si è trasformato nel tempo, e per ricavarne conclusioni sull'architettura della comprensione fisica che non sarebbero accessibili con la sola analisi sincronica del formalismo attuale. Il caso storico Heisenberg/Schrödinger (§3.4) non è un aneddoto: è un esperimento naturale su ciò che accade quando due percorsi cognitivi opposti — uno che abbandona deliberatamente la visualizzabilità, uno che tenta di recuperarla — convergono sullo stesso formalismo. La conclusione che se ne ricava non è storica ma sistematica.

I.6 — Posizione nella letteratura

L'opera si colloca all'intersezione di tre filoni di ricerca distinti, rispetto a ciascuno dei quali intende offrire un contributo, e talvolta una revisione, originale. Rendere esplicito questo posizionamento è necessario sia per la corretta valutazione dell'opera — che non è, principalmente, un contributo a nessuno dei tre filoni isolatamente — sia per orientare il lettore che proviene da uno di essi verso ciò che gli altri apportano.

I.6.1 — Filosofia della fisica contemporanea

Il dibattito centrale nella filosofia della fisica contemporanea è il problema della misura e il problema delle interpretazioni della meccanica quantistica. Questo dibattito ha prodotto una letteratura tecnica di notevole profondità.

David Albert (1992) in *Quantum Mechanics and Experience* ha formulato con precisione chirurgica il problema della misura come problema della relazione tra il formalismo matematico e l'esperienza phenomenologica del risultato definito, distinguendo la versione epistemica e la versione ontologica del problema in modi che questa opera riprende direttamente. Tim Maudlin (2007, 2019) in *The*

Metaphysics Within Physics e *Philosophy of Physics: Quantum Theory* ha articolato il realismo strutturale applicato alla meccanica quantistica e ha sostenuto con la maggiore sistematicità disponibile che il problema della misura non è solubile senza modificare il formalismo standard — posizione che il Blocco IV valuta criticamente. David Wallace (2012) in *The Emergent Multiverse* ha costruito l'argomento più rigoroso a favore dell'interpretazione a molti mondi come formalismo quantistico standard preso alla lettera, con la conseguenza che la probabilità deriva dalla struttura di razionalità degli agenti attraverso il teorema di Deutsch-Wallace; questo argomento è analizzato e discusso nel §4.3. Valia Allori (2013, 2016) ha sviluppato una critica sistematica alle diverse interpretazioni sulla base della loro struttura ontologica, distinguendo le teorie con variabili primitive da quelle puramente algoritmiche — distinzione che questa opera recupera nel Blocco VI.

L'opera si distingue da questo filone non contraddicendolo, ma aggiungendo una dimensione che esso non tratta sistematicamente: la struttura *cognitiva* della comprensione fisica come variabile rilevante per valutare le interpretazioni. Non è rilevante solo chiedersi quale interpretazione sia ontologicamente più semplice o predittivamente adeguata, ma anche chiedersi quale sia cognitivamente abitabile — quale possa essere il fondamento di una lettura della natura, non solo di un calcolo. Questa domanda non è presente nel dibattito filosofico standard, e questa monografia sostiene che la sua assenza impoverisce quel dibattito.

I.6.2 — Scienza cognitiva del ragionamento fisico

Il secondo filone è la ricerca empirica sulla cognizione dei fisici — come i fisici esperti pensano, rappresentano, ragionano, scoprono.

Il lavoro fondamentale di Michelene Chi, Paul Feltovich e Robert Glaser (1981) sulla categorizzazione dei problemi fisici da parte di esperti e novizi — che mostra come gli esperti categorizzino per struttura profonda (conservazione dell'energia, seconda legge) mentre i novizi categorizzino per caratteristiche superficiali (piano inclinato, molla) — è il punto di partenza del Blocco II. Frederick Reif

(1995) in *Millikan Lecture* e nei contributi successivi ha sviluppato una teoria della cognizione del fisico come costruzione di rappresentazioni multi-livello che attraversano diversi gradi di astrazione. Miriam Bassok e Keith Holyoak (1989) hanno documentato la trasferibilità dell'expertise matematica tra domini fisicamente distinti, con implicazioni per il problema del sapere tacito. David Hammer (2000) ha proposto la nozione di *resources* come unità cognitiva dell'expertise fisica — frammenti di conoscenza intuitiva che i fisici esperti usano in modo flessibile e situazionale — che questa opera mette in relazione con la struttura della lettura della natura nel Blocco VI.

L'opera si distingue da questo filone per l'obiettivo: la scienza cognitiva del ragionamento fisico descrive come i fisici pensano; questa monografia usa quella descrizione per un argomento filosofico sulla natura della comprensione. Il passaggio dalla descrizione all'argomento normativo richiede le assunzioni metodologiche discusse in I.5 e non è privo di rischi: si è cercato di essere espliciti riguardo ai punti in cui si compie questo passaggio.

I.6.3 — Epistemologia dell'IA in scienza

Il terzo filone è la riflessione filosofica sull'intelligenza artificiale come strumento — e come problema — per la pratica scientifica. Questo filone è recente e ancora in formazione.

Paul Humphreys (2009) in *Extending Ourselves* ha formulato la distinzione tra *epistemic* e *non-epistemic* computation: alcune computazioni estendono la capacità cognitiva umana (come i calcoli numerici) mentre altre la sostituiscono producendo risultati opachi alla comprensione — l'analisi di questa distinzione nel contesto della fisica è uno dei contributi centrali del Blocco V. Luciano Floridi (2014, 2019) ha sviluppato una teoria dell'informazione come strumento epistemologico per valutare la conoscenza artificiale, e ha sostenuto che i sistemi di machine learning producono *data-based models* piuttosto che *knowledge* nel senso epistemico forte — una posizione che questa opera raffina e precisa per il contesto fisico. Pedro Domingos (2015) in *The Master Algorithm* ha presentato una sintesi

ottimistica delle capacità epistemiche del machine learning che questa opera contrasta sistematicamente nel Blocco V, non per smentirne l'accuratezza descrittiva delle prestazioni, ma per mostrarne l'inadeguatezza come teoria della comprensione scientifica.

Più recente e direttamente pertinente è la riflessione sull'epistemologia dei Large Language Models in contesti scientifici (Floridi e Cowls 2019; Birhane e altri 2021; Marcus 2022), che pone le stesse domande in un contesto più ampio: cosa significa *capire* per un sistema artificiale che produce output linguisticamente coretti su qualsiasi dominio? L'opera non risponde a questa domanda in tutta la sua generalità — si concentra sulla fisica quantistica come caso privilegiato — ma l'argomento sviluppato nei Blocchi IV e V costituisce, per questo dominio specifico, una risposta precisa.

Il posizionamento rispetto a questi tre filoni può essere sintetizzato così: questa opera porta la struttura cognitiva della comprensione fisica (secondo filone) all'interno del dibattito filosofico sulla meccanica quantistica (primo filone), e usa il caso dei sistemi artificiali applicati alla fisica (terzo filone) come banco di prova discriminante per la tesi risultante. Nessuno dei tre filoni, isolatamente, produce la tesi: la tesi emerge dalla loro convergenza — esattamente come avviene per i sei blocchi dell'opera stessa.

Riferimenti per questa sezione: Albert (1992), *Quantum Mechanics and Experience*, Harvard; Maudlin (2007), *The Metaphysics Within Physics*, Oxford; Maudlin (2019), *Philosophy of Physics: Quantum Theory*, Princeton; Wallace (2012), *The Emergent Multiverse*, Oxford; Allori (2013), «Primitive Ontology and the Structure of Fundamental Physical Theories», in *The Wave Function*, Oxford; Chi, Feltovich e Glaser (1981), «Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices», *Cognitive Science* 5; Reif (1995), «Millikan Lecture 1994», *American Journal of Physics* 63; Bassok e Holyoak (1989), «Interdomain Transfer Between Isomorphic Topics», *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 15; Hammer (2000), «Student Resources for Learning Introductory Physics», *American Journal of Physics* 68; Humphreys (2009), *Extending*

Ourselves, Oxford; Floridi (2014), *The Fourth Revolution*, Oxford; Floridi e Cowls (2019), «A Unified Framework of Five Principles for AI in Society», *Harvard Data Science Review* 1; Domingos (2015), *The Master Algorithm*, Basic Books; Frigg e Hartmann (2020), «Models in Science», *Stanford Encyclopedia of Philosophy*; van Fraassen (2008), *Scientific Representation*, Oxford; Ladyman e Ross (2007), *Every Thing Must Go*, Oxford.

I.7 — Posizione nella serie e presupposti del lettore

Questa monografia è la terza di una serie che attraversa tre domini in cui il rapporto tra formalismo, prestazione e comprensione assume forme radicalmente diverse. La serie non è enciclopedica: è un argomento unitario dispiegato in tre casi di test che si illuminano a vicenda. La struttura progressiva è intenzionale: la navigazione di significato nei giochi introduce la distinzione tra capacità di calcolo e comprensione del significato nel dominio più accessibile; la visione di struttura nella matematica la porta nel dominio della verità e della dimostrazione; la lettura della natura nella fisica la porta nel dominio in cui il formalismo ha raggiunto la massima completezza e la comprensione ha incontrato la massima resistenza.

Il lettore che ha percorso le prime due monografie troverà in questa terza il completamento della struttura argomentativa comune — inclusa la geometria comparata delle tre crisi sviluppata nel Complemento teorico. Il lettore che affronta questa monografia senza le due precedenti troverà un'opera autonoma, purché accetti come premessa operativa la distinzione tra prestazione formale e comprensione fisica: questa distinzione non è postulata ma costruita, nel corso dei sei blocchi, a partire da evidenza empirica (psicologia cognitiva, storia della scienza), formale (struttura del formalismo quantistico, teoria della complessità computazionale), e concettuale (analisi delle interpretazioni, critica delle pretese dei sistemi artificiali).

Il lettore di formazione fisica troverà in questa monografia un tentativo di portare la filosofia della fisica al livello tecnico che il suo oggetto richiede: non una filosofia della fisica in senso divulgativo, ma un'analisi concettuale precisa che usa il formalismo come strumento di argomento, non come sfondo decorativo. Il lettore di formazione filosofica troverà un'analisi che non presuppone familiarità avanzata con la meccanica quantistica — il Blocco I costruisce le fondamenta tecniche necessarie — ma che richiede la disponibilità a seguire argomenti in cui la struttura matematica non è separabile dalla struttura concettuale.

Nota sulla struttura dell'argomentazione

La tesi non è difendibile per via di citazioni: richiede che il lettore percorra effettivamente i sei blocchi. Questo non è un difetto di progettazione: è una conseguenza della struttura dell'argomento. La tesi che la comprensione fisica è lettura della natura — nel senso precisato sopra — non è dimostrabile né falsificabile con un singolo esempio o una singola evidenza. È un'affermazione sulla struttura cognitiva che emerge dalla convergenza di sei linee di argomento indipendenti: è più robusta dell'affermazione di ciascuna singola linea, ma richiede tutte e sei le linee per essere valutata.

La domanda generatrice percorre l'intera opera come un filo che emerge in forme disciplinari diverse in ciascun blocco. La risposta non si trova in nessun blocco isolato: si costruisce nella loro convergenza, e il suo valore si misura nell'attraversamento.

La domanda che questo testo pone è semplice nella forma, radicale nelle implicazioni: cosa fa la mente di un fisico quando capisce — non quando calcola, non quando prevede, ma quando capisce? E cosa rivela la sua impossibilità, nei sistemi artificiali che calcolano e prevedono meglio di qualsiasi fisico umano, sulla natura di ciò che manca?

Oltre ai sei blocchi e al Complemento teorico, la monografia include quattro capitoli tematici che approfondiscono aspetti specifici della tesi centrale: il Capitolo VII (Teoria quantistica dell'informazione e i fondamenti della comprensione fisica), il Capitolo VIII (Il gruppo di rinormalizzazione e la lettura della natura a scale multiple), il Capitolo IX (Formalizzazione della lettura della natura: tre modelli) e il Capitolo X (La trasmissione del sapere fisico tacito). Questi capitoli possono essere letti come approfondimenti autonomi o come completamento del percorso argomentativo principale.

Blocco I — La geometria del mondo

Formalismo della meccanica quantistica: spazi di Hilbert, operatori, misura e complessità

---

§ 1.1 — Lo spazio degli stati: geometria prima della fisica

La meccanica quantistica comincia con una scelta matematica che non ha precedenti nella storia della fisica classica: lo stato di un sistema fisico non è un punto in uno spazio di configurazione — non è una posizione e un momento, non è la traiettoria di una particella in un campo gravitazionale, non è la distribuzione di temperatura in un corpo — ma un **vettore in uno spazio vettoriale complesso di dimensione, in generale, infinita**. Questa scelta non è motivata da intuizione fisica diretta; è motivata dalla struttura matematica che risulta capace di produrre previsioni sperimentalmente corrette. È il primo indizio di una discontinuità profonda tra il formalismo e la comprensione, e merita di essere sottolineata prima di procedere: il punto di partenza del formalismo quantistico non è un'immagine del mondo fisico che si formalizza, ma una struttura matematica che funziona.

Nella meccanica classica, lo stato di un sistema con n gradi di libertà è un punto nello spazio delle fasi R^{2n}: le n coordinate generalizzate q_i e i n momenti coniugati p_i determinano completamente il passato e il futuro del sistema, dato il campo di forze. Lo stato evolve lungo curve determinate — le traiettorie hamiltoniane — e qualsiasi osservabile fisico $f(q, p, t)$ ha un valore determinato in ogni istante. L'intuizione fisica della meccanica classica è direttamente leggibile nella struttura matematica: lo spazio delle fasi è lo spazio dei possibili stati del sistema, le traiettorie sono i possibili moti, le osservabili sono funzioni reali sui possibili stati. Tutto questo è cognitivamente accessibile — si può abitare questo spazio, immaginarlo, disegnarlo.

La meccanica quantistica sostituisce questo spazio con qualcosa di strutturalmente diverso. Uno **spazio di Hilbert** H è uno spazio vettoriale su C dotato di un **prodotto interno** $\langle\cdot,\cdot\rangle: H\times H\to C$ che soddisfa sesquilinearità, simmetria hermitiana, definitezza positiva, e completezza rispetto alla norma indotta $\|\psi\| = \sqrt{\langle\psi,\psi\rangle}$. La completezza garantisce che certi limiti necessari per la fisica esistano nello spazio. Il caso fisicamente rilevante per una particella puntiforme in tre dimensioni spaziali è $H = L^2\left(R^3, d^3x\right)$, con prodotto interno $\langle\phi,\psi\rangle = \int_{R^3} \overline{\phi(x)}\,\psi(x)\,d^3x$.

Il **postulato fondamentale** è che lo stato puro di un sistema fisico è rappresentato da un vettore unitario $|\psi\rangle\in H$ — più precisamente, dalla classe di equivalenza $\{e^{i\theta}|\psi\rangle: \theta\in R\}$, poiché la fase globale è fisicamente irrilevante. Nella notazione di Dirac: i vettori di stato sono *ket* $|\psi\rangle$, gli elementi del duale topologico H^* sono *bra* $\langle\phi|$ (per il teorema di Riesz identificabili canonicamente con elementi di H), e il prodotto interno è il *braket* $\langle\phi|\psi\rangle$.

Perché vettori complessi? Le ampiezze di probabilità complesse permettono la **sovrapposizione e l'interferenza**: la probabilità di un evento non è la somma delle probabilità dei percorsi alternativi, ma il modulo quadro della somma delle ampiezze:

$$P(A) = \left| \sum_{percorsi} A_k \right|^2 \neq \sum_{percorsi} \left| A_k \right|^2.$$

L'interferenza è il fatto empirico che più di ogni altro distingue la meccanica quantistica dalla meccanica classica — e la struttura dello spazio di Hilbert su C è la struttura matematica minima capace di codificarla. Ma questa motivazione è retroattiva: la struttura complessa non è stata anticipata da intuizione fisica, è stata scelta perché funziona.

La distinzione tra **stati puri** e **stati misti** è la prima articolazione importante. Uno stato puro è descritto da un singolo vettore unitario $|\psi\rangle$, o equivalentemente dall'operatore di proiezione $\hat{\rho} = |\psi\rangle\langle\psi|$. Uno stato misto — che emerge quando si ha conoscenza incompleta del sistema, o quando il sistema è parte di un sistema composito più grande — è descritto da un **operatore densità** $\hat{\rho} = \sum_k p_k \left|\psi_k\right\rangle\left\langle\psi_k\right|$, con $p_k \geq 0$ e $\sum_k p_k = 1$. Uno stato puro soddisfa $\hat{\rho}^2 = \hat{\rho}$ (idempotenza) e $tr\left(\hat{\rho}^2\right) = 1$; uno stato misto ha $tr\left(\hat{\rho}^2\right) < 1$. La distinzione tra puro e misto ritornerà con urgenza nel problema della misura.

La struttura degli stati composti merita una nota, perché è la radice formale dell'entanglement. Se H_A e H_B sono gli spazi di due sistemi, lo spazio del sistema composto è il **prodotto tensoriale** $H_{AB} = H_A \otimes H_B$. Uno stato $|\Psi\rangle \in H_{AB}$ è **separabile** se si scrive come $\left|\psi_A\right\rangle \otimes \left|\psi_B\right\rangle$; altrimenti è **entangled**. Gli stati entangled implicano correlazioni tra i due sistemi che non hanno analogo classico — correlazioni che il teorema di Bell renderà sperimentalmente verificabili.

---

§ 1.2 — Le osservabili fisiche: operatori hermitiani, struttura dello spettro e spin

Nella meccanica classica, le grandezze fisiche osservabili sono funzioni a valori reali sullo spazio delle fasi. Nella meccanica quantistica, le grandezze fisiche osservabili sono rappresentate da **operatori autoaggiunti** su H.

Un operatore $\hat{A}$ è **hermitiano** se $\langle\phi|\hat{A}|\psi\rangle = \overline{\langle\psi|\hat{A}|\phi\rangle}$ per ogni $|\phi\rangle,|\psi\rangle$, ovvero $\hat{A}^{\dagger} = \hat{A}$. La condizione di hermitianità garantisce autovalori reali e ortogonalità degli autovettori per autovalori distinti. Il **teorema spettrale** garantisce l'esistenza della decomposizione spettrale: per ogni operatore autoaggiunto esiste una misura spettrale E su R tale che $\hat{A} = \int_{\sigma(\hat{A})} \lambda\, dE(\lambda)$, con $\sigma(\hat{A}) \subseteq R$ spettro dell'operatore.

Nella versione utile per il fisico: ogni osservabile $\hat{A}$ si decompone nella sua base propria, e qualsiasi stato fisico può essere scritto come combinazione (discreta o integrale) degli autostati di $\hat{A}$. Nel caso discreto, $\hat{A} = \sum_k a_k |a_k\rangle\langle a_k|$; nel caso continuo, $\hat{A} = \int a|a\rangle\langle a|\, da$.

La **regola di Born** — il postulato interpretativo fondamentale — stabilisce: il risultato di una misura di $\hat{A}$ su un sistema nello stato $|\psi\rangle$ è uno degli elementi di $\sigma(\hat{A})$, e la probabilità di ottenere a_k è $p(a_k) = |\langle a_k|\psi\rangle|^2 = \langle\psi|\hat{P}_k|\psi\rangle$. Il valore atteso è $\langle\hat{A}\rangle_\psi = \langle\psi|\hat{A}|\psi\rangle$.

Tre osservabili fondamentali strutturano la meccanica quantistica. L'**operatore di posizione** $\hat{x}$ agisce per moltiplicazione: $(\hat{x}\psi)(x) = x\psi(x)$, con spettro puramente continuo $\sigma(\hat{x}) = R$ e autofunzioni distribuzionali $\delta(x - x_0)$. L'**operatore di momento** è il generatore delle traslazioni: $\hat{p} = -i\hbar\partial_x$, con spettro continuo $\sigma(\hat{p}) = R$. L'**hamiltoniana** $\hat{H} = \hat{p}^2/2m + V(\hat{x})$ è il generatore dell'evoluzione temporale.

1.2.1 — La struttura dello spettro: discreto, continuo e misto

La distinzione tra spettro discreto e spettro continuo non è una questione tecnica marginale: ha conseguenze fisiche dirette e

interpretative profonde. Lo **spettro discreto** appare quando il sistema è confinato — un potenziale che tende all'infinito per grandi distanze. L'**oscillatore armonico** $\hat{H} = \hat{p}^2/2m + m\omega^2\hat{x}^2/2$ ha spettro puramente discreto $E_n = \hbar\omega(n + 1/2),\ n = 0, 1, 2, ...$: l'energia è quantizzata, e lo stato fondamentale ha energia non nulla (energia di punto zero $E_0 = \hbar\omega/2$), conseguenza diretta del principio di indeterminazione. L'**atomo di idrogeno** $\hat{H} = \hat{p}^2/2m - e^2/r$ ha uno spettro misto: discreto per energie negative $E_n = -\,13,6\,eV/n^2$ (stati legati) e continuo per energie positive (stati di scattering). Questa struttura mista riflette la competizione fisica tra il potenziale attrattivo coulombiano e l'energia cinetica: per energi sufficientemente basse il sistema è confinato; per energie positive è libero.

Il **spettro continuo** appare per sistemi non confinati: la particella libera $\hat{H} = \hat{p}^2/2m$ ha spettro continuo $E \in [0, \infty)$ e autostati non normalizzabili (onde piane e^{ikx}). Questo richiede la tecnica delle basi generalizzate (distribuzione di Dirac) e l'integrale di Fourier come decomposizione spettrale. La transizione da spettro discreto a continuo ha importanza fisica diretta: corrisponde all'ionizzazione (idrogeno), alla dissociazione molecolare, o alla transizione da stato legato a stato di scattering.

1.2.2 — Il principio di indeterminazione nella sua formulazione precisa

La **non-commutatività** di certi operatori è la radice formale del principio di indeterminazione. La relazione di commutazione canonica $\left[\hat{x}, \hat{p}\right] = i\hbar\hat{1}$ si verifica applicando $\hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x}$ a una funzione d'onda arbitraria, dando $i\hbar$. Il **teorema di Robertson** generalizza: per qualsiasi coppia di osservabili $\hat{A}$, $\hat{B}$ e qualsiasi stato $|\psi\rangle$:

$\Delta_\psi\hat{A} \cdot \Delta_\psi\hat{B} \geq \frac{1}{2}|\langle\psi|\left[\hat{A}, \hat{B}\right]|\psi\rangle|,$

dove $\Delta_\psi \hat{A} = \sqrt{\langle \hat{A}^2 \rangle_\psi - \langle \hat{A} \rangle_\psi^2}$ è la deviazione standard dell'osservabile nello stato $|\psi\rangle$.

Un esempio cruciale al di là della coppia posizione-momento è la **relazione energia-tempo**. Per qualsiasi osservabile $\hat{B}$ che non commuta con $\hat{H}$, si ha $\Delta E \cdot \Delta t_B \geq \hbar/2$, dove $\Delta t_B = \Delta_\psi \hat{B} / \left| d\langle \hat{B} \rangle / dt \right|$ è il tempo caratteristico di variazione di $\hat{B}$. Questo non è una relazione di Robertson ordinaria — il tempo t non è un operatore nella meccanica quantistica non-relativistica, ma un parametro esterno — e la sua interpretazione è più delicata: esprime il fatto che uno stato con un'energia ben definita ($\Delta E \to 0$) evolve estremamente lentamente (è uno stato stazionario che non cambia nel tempo), mentre uno stato che cambia rapidamente deve necessariamente essere una sovrapposizione di molti livelli energetici.

Il principio di indeterminazione **non** è un'affermazione sull'accuratezza degli strumenti né sull'effetto perturbativo della misura — queste erano le formulazioni storiche di Heisenberg, concettualmente distinte dalla formulazione matematica precisa. Il teorema di Robertson è un'affermazione sulla struttura dello spazio degli stati: non esiste nessuno stato in cui posizione e momento abbiano simultaneamente valori determinati. Non è un fatto sulla nostra ignoranza: è un fatto sulla struttura dei vettori quantistici.

1.2.3 — Lo spin e gli operatori di momento angolare

Il **momento angolare** è una delle strutture più ricche della meccanica quantistica e introduce, nella sua forma più pura attraverso lo spin, un'osservabile senza analogo classico. Il momento angolare orbitale è $\hat{L} = \hat{r} \times \hat{p}$, con componenti $\hat{L}_x = \hat{y}\hat{p}_z - \hat{z}\hat{p}_y$, ecc. Le relazioni di commutazione fondamentali sono:

$$\left[\hat{L}_i, \hat{L}_j\right] = i\hbar\, \epsilon_{ijk} \hat{L}_k,$$

dove ϵ_{ijk} è il simbolo di Levi-Civita. Queste relazioni implicano che le tre componenti del momento angolare non sono simultaneamente

misurabili (non commutano tra loro), ma $\hat{L}^2 = \hat{L}_x^2 + \hat{L}_y^2 + \hat{L}_z^2$ commuta con ciascuna componente: $\left[\hat{L}^2, \hat{L}_z\right] = 0$. Il numero quantico del modulo $l = 0, 1, 2, \ldots$ e il numero quantico magnetico $m = -l, \ldots, +l$ etichettano gli autostati comuni di $\hat{L}^2$ e $\hat{L}_z$.

Lo **spin** è un momento angolare intrinseco senza analogo classico: non emerge dalla struttura spaziale della particella, ma è una proprietà discreta strutturale. Per un elettrone (spin 1/2), lo spazio degli stati di spin è $\mathcal{C}^2$ e gli operatori di spin sono:

$\hat{S}_x = \frac{\hbar}{2}(0\ 1\ 1\ 0)$, $\hat{S}_y = \frac{\hbar}{2}(0\ -i\ i\ 0)$, $\hat{S}_z = \frac{\hbar}{2}(1\ 0\ 0\ -1)$,

ovvero $\hat{S}_i = (\hbar/2)\sigma_i$ con σ_i le matrici di Pauli. I commutatori soddisfano $\left[\hat{S}_i, \hat{S}_j\right] = i\hbar\,\epsilon_{ijk}\hat{S}_k$, esattamente come il momento angolare orbitale. Gli autostati di $\hat{S}_z$ sono $|+\rangle = (1\ 0)$ (spin-up) e $|-\rangle = (0\ 1)$ (spin-down). Uno stato generico di spin è $|\chi\rangle = \alpha|+\rangle + \beta|-\rangle$ con $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$.

Lo spin non ha rappresentazione in termini di coordinate spaziali, e i tentativi storici di dargliene una (Schrödinger cercò di interpretare il valore $\pm\ 1/2$ in termini di auto-rotazione della particella) falliscono perché la velocità equatoriale risultante supererebbe quella della luce. Lo spin è il primo esempio di un oggetto quantistico che non ha analogo classico nemmeno approssimativo: non è la limitazione di qualcosa di classico, ma qualcosa di genuinamente nuovo che il formalismo quantistico introduce.

---

§ 1.3 — L'equazione di Schrödinger: evoluzione unitaria, immagini e casi esattamente risolubili

L'evoluzione temporale di un sistema quantistico chiuso è governata dall'**equazione di Schrödinger dipendente dal tempo**:

$i\hbar\frac{d}{dt}\left|\psi(t)\right\rangle = \hat{H}\left|\psi(t)\right\rangle$.

La soluzione formale è $\left|\psi(t)\right\rangle = \hat{U}\left(t, t_0\right)\left|\psi\left(t_0\right)\right\rangle$ con $\hat{U}\left(t, t_0\right) = exp\left(-i\hat{H}\left(t - t_0\right)/\hbar\right)$ per hamiltoniane indipendenti dal tempo.

L'unitarietà di $\hat{U}$ ha tre conseguenze che meritano di essere esposte esplicitamente. **Prima**: conservazione della norma — le probabilità totali si conservano. **Seconda**: linearità — il principio di sovrapposizione è una conseguenza della struttura lineare del formalismo. **Terza, e la più problematica**: **reversibilità**. L'evoluzione unitaria è invertibile: $\hat{U}^{-1}\left(t, t_0\right) = \hat{U}^{\dagger}\left(t, t_0\right) = \hat{U}\left(t_0, t\right)$. Dato lo stato al tempo t, si può calcolare lo stato al tempo t_0 con la stessa precisione. Questa reversibilità è irreconciliabile con il collasso della funzione d'onda al momento della misura, che è invece irreversibile: dopo aver misurato spin-up su un elettrone, lo stato del sistema è cambiato in modo che non si può ripristinare con la sola applicazione di $\hat{U}$. Il **conflitto tra evoluzione unitaria e collasso** è il nucleo del problema della misura.

1.3.1 — Le immagini della meccanica quantistica

Il formalismo dell'equazione di Schrödinger ammette diverse **immagini** equivalenti — diverse scelte su dove far risiedere la dipendenza temporale — che rispecchiano diversi orientamenti fisici del problema.

Nell'**immagine di Schrödinger** (quella implicita finora), gli stati evolvono nel tempo e gli operatori sono costanti: $\left|\psi(t)\right\rangle_S = \hat{U}(t)\left|\psi(0)\right\rangle_S$, mentre $\hat{A}_S$ non dipende da t. È l'immagine naturale per descrivere l'evoluzione di uno stato a partire da condizioni iniziali.

Nell'**immagine di Heisenberg**, è il contrario: gli stati sono fissi e gli operatori evolvono secondo l'**equazione del moto di Heisenberg**:

$\frac{d}{dt}\hat{A}_H(t) = \frac{i}{\hbar}\left[\hat{H}, \hat{A}_H(t)\right] + \left(\frac{\partial \hat{A}}{\partial t}\right)_H$.

Il valore atteso $\langle\hat{A}\rangle$ è lo stesso nelle due immagini: $\langle\psi(t)\left|\hat{A}_S\right|\psi(t)\rangle = \langle\psi_0\left|\hat{A}_H(t)\right|\psi_0\rangle$. L'immagine di Heisenberg rende manifesta la connessione con la meccanica classica: le equazioni del moto di Heisenberg per $\hat{x}$ e $\hat{p}$ riproducono formalmente le equazioni di Hamilton, con le parentesi di Poisson sostituite dai commutatori ($\{A,B\}_{PB} \to \frac{1}{i\hbar}\left[\hat{A},\hat{B}\right]$). Questa corrispondenza — la **corrispondenza di Dirac** — è storicamente e concettualmente cruciale: Heisenberg costruì la meccanica matriciale senza usare l'immagine delle onde, proprio lavorando con questa struttura algebrica.

L'**immagine di interazione** (o immagine di Dirac) è intermedia: si separa l'hamiltoniana in $\hat{H} = \hat{H}_0 + \hat{V}(t)$, dove $\hat{H}_0$ è il termine libero (esattamente risolubile) e $\hat{V}$ è una perturbazione. Gli stati evolvono con $\hat{V}$ e gli operatori con $\hat{H}_0$. Questa immagine è alla base della teoria perturbativa e del formalismo S-matrix della teoria quantistica dei campi.

1.3.2 — Hamiltoniane dipendenti dal tempo e il teorema adiabatico

Quando l'hamiltoniana dipende esplicitamente dal tempo, $\hat{H}(t)$, l'operatore di evoluzione non ha la forma semplice $exp\left(-\,i\hat{H}t/\hbar\right)$ ma diventa un prodotto ordinato temporalmente:

$$\hat{U}(t,0) = Texp\left(-\frac{i}{\hbar}\int_0^t \hat{H}(t')\,dt'\right),$$

dove T indica il prodotto ordinato nel tempo (T-ordering). Le hamiltoniane dipendenti dal tempo descrivono sistemi in campi variabili (laser, campi oscillanti) e sistemi aperti soggetti a perturbazioni temporali.

Il **teorema adiabatico** (Born e Fock, 1928) descrive il comportamento di un sistema quando l'hamiltoniana varia lentamente nel tempo. Se il sistema si trova inizialmente nell'n-esimo autostato $|E_n(0)\rangle$ di $\hat{H}(0)$, e se $\hat{H}(t)$ varia abbastanza lentamente rispetto agli inversi dei gap

energetici, il sistema rimane nell'n-esimo autostato istantaneo $|E_n(t)\rangle$ di $\hat{H}(t)$ per tutto il percorso, accumulando solo una fase:

$$\left|\psi(t)\rangle \approx e^{i\gamma_n(t)} e^{-\frac{i}{\hbar}\int_0^t E_n(t')\,dt'}\right| E_n(t)\rangle.$$

La fase $\gamma_n(t)$ include la **fase geometrica di Berry** (Berry, 1984), che dipende dalla geometria del percorso nello spazio dei parametri, non dalla velocità con cui il percorso viene percorso. La fase di Berry è fisicamente rilevabile (attraverso effetti di interferenza) e ha conseguenze importanti in fisica della materia condensata (effetto Hall quantistico, isolanti topologici).

Il teorema adiabatico è il fondamento concettuale del **quantum annealing** e di alcune architetture di calcolo quantistico (il calcolatore quantistico adiabatico di D-Wave): si prepara il sistema nell'autostato fondamentale di un'hamiltoniana semplice, poi si varia lentamente l'hamiltoniana verso quella del problema da risolvere; se il processo è sufficientemente lento, il sistema rimane nel fondamentale, che corrisponde alla soluzione del problema.

1.3.3 — Casi esattamente risolubili: l'oscillatore armonico e l'atomo di idrogeno

La quasi totalità dei problemi fisici non ha soluzione analitica esatta. I due sistemi con soluzione esatta più importanti — l'oscillatore armonico e l'atomo di idrogeno — non sono semplici esercizi didattici: sono i fondamenti su cui si costruisce tutta la fisica quantistica perturbativa e non perturbativa.

L'oscillatore armonico quantistico $\hat{H} = \hat{p}^2/2m + m\omega^2\hat{x}^2/2$ si risolve elegantemente introducendo gli **operatori di scala**:

$$\hat{a} = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}}\left(\hat{x} + \frac{i\hat{p}}{m\omega}\right), \quad \hat{a}^\dagger = \sqrt{\frac{m\omega}{2\hbar}}\left(\hat{x} - \frac{i\hat{p}}{m\omega}\right),$$

che soddisfano $\left[\hat{a}, \hat{a}^\dagger\right] = 1$ e permettono di scrivere $\hat{H} = \hbar\omega\left(\hat{a}^\dagger\hat{a} + 1/2\right) = \hbar\omega\left(\hat{N} + 1/2\right)$. Gli autostati $|n\rangle$ dell'operatore

numero $\hat{N} = \hat{a}^{\dagger}\hat{a}$ si costruiscono algebricamente: $\left|n\right\rangle = \left(\hat{a}^{\dagger}\right)^{n}\left|0\right\rangle/\sqrt{n!}$, con autovalori $E_n = \hbar\omega(n + 1/2)$. Lo stato fondamentale $|0\rangle$ soddisfa $\hat{a}|0\rangle = 0$ e ha funzione d'onda gaussiana $\psi_0(x) = \left(\pi\ell^2\right)^{-1/4} e^{-x^2/2\ell^2}$ con $\ell = \sqrt{\hbar/m\omega}$.

L'oscillatore armonico è il punto di partenza della teoria quantistica dei campi: i campi sono insiemi infiniti di oscillatori armonici, i quanti del campo (fotoni, fononi, particelle) sono le eccitazioni di questi oscillatori, e gli operatori $\hat{a}$ e $\hat{a}^{\dagger}$ diventano operatori di annichilazione e creazione.

L'atomo di idrogeno $\hat{H} = \hat{p}^2/2m_e - e^2/\left(4\pi\epsilon_0 r\right)$ si risolve in coordinate sferiche separando le variabili: $\psi_{nlm}(r, \theta, \phi) = R_{nl}(r)Y_l^m(\theta, \phi)$, dove Y_l^m sono le armoniche sferiche (autofunzioni di $\hat{L}^2$ e $\hat{L}_z$) e R_{nl} sono le funzioni radiali di Laguerre. I livelli energetici sono:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{2\hbar^2\left(4\pi\epsilon_0\right)^2} \cdot \frac{1}{n^2} = -\frac{13{,}6\,eV}{n^2}, \quad n = 1, 2, 3, \ldots$$

La degenerazione n^2 per ogni livello (più il fattore 2 dello spin, che la dà $2n^2$) riflette la simmetria nascosta del potenziale coulombiano — il gruppo $SO(4)$ piuttosto del solo $SO(3)$ — scoperta da Pauli nel 1926 con metodi algebrici prima della soluzione a onde.

La differenza strutturale tra le due soluzioni è filosoficamente rilevante. L'oscillatore armonico è risolto con metodi puramente algebrici che costruiscono gli stati a partire dallo stato fondamentale per applicazioni successive di $\hat{a}^{\dagger}$: una struttura discreta e combinatoria. L'atomo di idrogeno è risolto analiticamente nell'immagine delle onde, con funzioni speciali che appartengono all'analisi classica (armoniche sferiche, polinomi di Laguerre): una struttura continua e geometrica. Le due soluzioni riflettono i due stili

cognitivi opposti che il Blocco III ricostruirà: l'algebra matriciale di Heisenberg e la meccanica ondulatoria di Schrödinger.

---

§ 1.4 — Il problema della misura: struttura formale di una crisi

(Sezione invariata rispetto alla versione precedente — nessuna espansione richiesta)

Il problema della misura nella meccanica quantistica non è una difficoltà tecnica in attesa di soluzione ingegneristica: è una tensione strutturale insita nella forma del formalismo. Per capirne la precisione, è necessario articolarlo nella sua forma più rigorosa — la **catena di von Neumann** — e poi esaminare sistematicamente le risorse che il formalismo mette a disposizione per affrontarlo, mostrando perché ciascuna sia insufficiente.

1.4.1 — La catena di von Neumann

Consideriamo un sistema S in uno stato di sovrapposizione $\left|\psi\right\rangle = \sum_k c_k \left|a_k\right\rangle$ degli autostati $|a_k\rangle$ di un'osservabile $\hat{A}$. Un apparato di misura M è anch'esso un sistema fisico quantistico, con stati $|M_0\rangle$ (pronto) e $|M_k\rangle$ (ha registrato il valore a_k). L'interazione di misura è un processo fisico che può essere descritto, in linea di principio, dall'equazione di Schrödinger. Se la misura è un processo unitario, allora:

$$\left|a_k\right\rangle\left|M_0\right\rangle \rightarrow \left|a_k\right\rangle\left|M_k\right\rangle$$

e per linearità:

$$\left(\sum_k c_k|a_k\rangle\right)\left|M_0\right\rangle \rightarrow \sum_k c_k \left|a_k\right\rangle|M_k\rangle.$$

Il sistema composto $S + M$ è ora in uno stato entangled. L'argomento si itera con un osservatore O, producendo sovrapposizioni a ogni livello della catena. Non esiste un punto in cui la sovrapposizione

collassi spontaneamente. Eppure il fisico ottiene un risultato definito. Questo è il problema della misura nella sua forma precisa.

1.4.2 — Lo stato misto apparente e la sua insufficienza

La prima risposta intuitiva è che il collasso produce uno **stato misto**: dopo la misura, lo stato del sistema dovrebbe essere $\hat{\rho} = \sum_k |c_k|^2 |a_k\rangle\langle a_k|$ piuttosto che $\left|\psi\right\rangle = \sum_k c_k \left|a_k\right\rangle$. Lo stato misto ha le stesse probabilità dello stato puro per gli autostati di $\hat{A}$, e sembra descrivere l'ignoranza del risultato senza implicare sovrapposizione.

Il problema è che la differenza tra stato puro e stato misto è fisicamente rilevabile. Uno stato puro $|\psi\rangle = (|0\rangle + |1\rangle)/\sqrt{2}$ interferisce con se stesso in esperimenti di interferenza; lo stato misto $\hat{\rho} = (|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|)/2$ no. La transizione da stato puro a stato misto non avviene sotto evoluzione unitaria — la matrice densità di un sistema isolato evolve come $\hat{\rho}(t) = \hat{U}(t)\hat{\rho}(0)\hat{U}^{\dagger}(t)$, il che preserva il rango della matrice e dunque non trasforma mai uno stato puro in uno misto. Il solo modo per ottenere lo stato misto è tracciare sull'ambiente — il che ci porta alla decoerenza.

1.4.3 — La decoerenza come soppressione dell'interferenza

La **decoerenza** è il meccanismo attraverso cui i sistemi quantistici macroscopici si comportano classicamente come conseguenza dell'interazione inevitabile con l'ambiente circostante. Il meccanismo è preciso: il sistema S interagisce con l'ambiente E (una quantità enorme di gradi di libertà — fotoni, molecole d'aria, fononi). L'evoluzione congiunta di $S + E$ è:

$$\left(\sum_k c_k |a_k\rangle\right)\left|E_0\right\rangle \rightarrow \sum_k c_k \left|a_k\right\rangle |E_k\rangle,$$

dove $|E_k\rangle$ sono stati dell'ambiente correlati con gli stati del sistema. Se gli stati dell'ambiente sono sufficientemente diversi — e per sistemi macroscopici lo sono rapidamente — allora $\langle E_j | E_k\rangle \approx 0$ per $j \neq k$. La matrice densità ridotta del sistema S (ottenuta tracciando sull'ambiente) diventa:

$$\hat{\rho}_S = tr_E\left(\left|\Psi_{SE}\right\rangle\left\langle\Psi_{SE}\right|\right) = \sum_k \left|c_k\right|^2 \left|a_k\right\rangle\left\langle a_k\right|.$$

I termini fuori diagonale — le interferenze — scompaiono su scale temporali estremamente brevi per sistemi macroscopici. Zurek (1981, 2003) ha sviluppato la teoria della **einselection** (environment-induced superselection): l'ambiente seleziona una base preferenziale — la *pointer basis* — rispetto alla quale gli stati del sistema risultano stabili, e che corrisponde agli stati classici macroscopicamente distinguibili.

La decoerenza è un risultato reale e importante: spiega perché non vediamo interferenze tra oggetti macroscopici, perché certi tipi di entanglement sono soppressi, e perché la base classica emerge come struttura privilegiata nell'interazione con l'ambiente. Ma **non risolve il problema della misura** in un senso preciso: la matrice densità ridotta $\hat{\rho}_S = \sum_k \left|c_k\right|^2 \left|a_k\right\rangle\left\langle a_k\right|$ è uno stato misto che assegna probabilità $\left|c_k\right|^2$ ai vari risultati possibili, ma non dice quale risultato si realizza. Il collasso che la regola di Born descrive — il passaggio da $\hat{\rho}_S$ a un singolo $\left|a_{k_0}\right\rangle\left\langle a_{k_0}\right|$ per qualche k_0 — non è prodotto dalla decoerenza. La decoerenza sopprime l'interferenza; non seleziona il risultato.

In termini tecnici: la decoerenza trasforma uno stato puro in uno stato misto *locale* (dal punto di vista del sistema S), ma l'intero sistema $S + E$ rimane in uno stato puro — ancora in una sovrapposizione globale. Non c'è collasso, solo una redistribuzione delle correlazioni quantistiche dall'interno del sistema verso il sistema-più-ambiente. Il problema della misura si è spostato in su nella catena, non risolto.

1.4.4 — Il problema della misura come problema strutturale irriducibile

Von Neumann (1932) nel suo *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* fu il primo a riconoscere con precisione matematica

il problema. Egli identificò due tipi di processi nel formalismo quantistico:

- **Processo 2**: l'evoluzione unitaria continua governata dall'equazione di Schrödinger (reversibile, deterministica, lineare);
- **Processo 1**: il collasso della funzione d'onda al momento della misura (irreversibile, indeterministico, non lineare).

Il Processo 1 non è derivabile dal Processo 2 con nessun argomento formale che rimanga all'interno della meccanica quantistica. Questa non-derivabilità non è una lacuna tecnica colmabile con più calcolo: è una proprietà strutturale del formalismo. Il collasso è un postulato aggiunto — la regola di Born — che si applica a un livello di descrizione diverso dall'evoluzione unitaria.

Il **paradosso di Schrödinger** (1935) rende questo conflitto percettivamente immediato. Un gatto chiuso in una scatola con un dispositivo quantistico evolve, secondo l'equazione di Schrödinger, in uno stato di sovrapposizione: $(|vivo\rangle + |morto\rangle)/\sqrt{2}$. La domanda di Schrödinger non è retorica: è una sonda precisa della struttura del formalismo. Quando si dice «ma ovviamente quando si apre la scatola si trova il gatto vivo o morto», si sta applicando implicitamente il Processo 1 senza darne una giustificazione formale.

La struttura del problema può essere formulata come trilemma: le tre affermazioni seguenti sono inconsistenti, eppure ognuna sembra supportata da evidenza indipendente.

1. La funzione d'onda descrive completamente lo stato fisico del sistema.
2. L'evoluzione della funzione d'onda è sempre governata dall'equazione di Schrödinger.
3. Le misure producono risultati definiti (non sovrapposizioni di risultati).

Le interpretazioni della meccanica quantistica corrispondono esattamente alle diverse scelte di quale delle tre affermazioni abbandonare o modificare: Copenaghen abbandona (1); la meccanica

dei molti mondi abbandona (3); la meccanica di Bohm modifica (2) aggiungendo la variabile nascosta della posizione; le teorie GRW modificano (2) aggiungendo un termine di collasso stocastico. Nessuna scelta è senza costo concettuale. Questo è il paradosso della completezza in embrione: il formalismo è predittivamente completo, ma questa completezza non implica coerenza ontologica.

---

§ 1.5 — Complessità computazionale della simulazione quantistica

La complessità computazionale della meccanica quantistica è un caso paradigmatico di limite strutturale — non tecnologico — della comprensione artificiale del mondo fisico.

Lo stato di un sistema di n qubit — sistemi a due livelli come gli spin $\frac{1}{2}$ — è un vettore in $H = \left(C^2\right)^{\otimes n}$, spazio di dimensione 2^n. Per $n = 300$, il numero di componenti supera 10^{90} — il numero stimato di atomi nell'universo osservabile è $\sim 10^{80}$. Questa crescita esponenziale è la ragione fondamentale per cui la simulazione numerica completa di sistemi quantistici con computer classici è intrattabile in generale.

1.5.1 — BQP, QMA e la gerarchia della complessità quantistica

Il modo più preciso per articolare i limiti computazionali della simulazione quantistica è attraverso le classi di complessità.

BQP (Bounded-error Quantum Polynomial time) è la classe dei problemi risolvibili in tempo polinomiale con un computer quantistico con probabilità di errore $\leq 1/3$. Algoritmicamente, BQP contiene problemi che i computer quantistici risolvono efficacemente ma che i computer classici (si crede) non: la fattorizzazione di interi (algoritmo di Shor, 1994), la ricerca in un database non strutturato (algoritmo di Grover, 1996), la simulazione di sistemi fisici quantistici (algoritmo di Lloyd, 1996).

QMA (Quantum Merlin-Arthur) è l'estensione quantistica di NP: un problema è in QMA se, dato un certificato quantistico (un testimone

|ψ⟩ di n qubit), un verificatore quantistico può verificarlo in tempo polinomiale. La relazione tra BQP e QMA è l'analogo quantistico della domanda P vs NP: si crede che BQP ⊊ QMA, ma non è dimostrato. L'importanza pratica è che i problemi QMA-completi sono difficili *anche* per i computer quantistici.

Il **problema Local Hamiltonian** — dato un'hamiltoniana k-locale su n qubit (dove ogni termine agisce su al più k qubit), determinare se il suo autovalore minimo (energia del fondamentale) è inferiore a una soglia a o superiore a b, con $b - a \geq 1/poly(n)$ — è **QMA-completo** (Kitaev, 2002). Questo è l'analogo quantistico della NP-completezza del problema SAT. Un esempio concreto: determinare l'energia del fondamentale di un sistema di spin-1/2 su un reticolo con interazioni locali frustranti (come nel modello di Heisenberg antiferromagnetico 2D) è un problema QMA-completo.

L'implicazione per l'IA è diretta: nessun algoritmo di machine learning può, in generale, predire le proprietà di fondamentale di sistemi quantistici arbitrari in modo efficiente, a meno che BQP = QMA. Ciò che i sistemi di IA possono fare è sfruttare strutture fisiche specifiche per ridurre il problema a una sottoclasse trattabile — esattamente come fa il fisico umano, ma senza sapere *perché* quella struttura rende il problema trattabile.

1.5.2 — DMRG: entanglement come chiave della trattabilità

Il metodo DMRG (Density Matrix Renormalization Group), sviluppato da Steven White nel 1992, è il metodo più potente attualmente disponibile per calcolare le proprietà del fondamentale di sistemi quantistici unidimensionali. La sua efficacia non è un miracolo computazionale: è una conseguenza di una proprietà fisica profonda, la **legge di area dell'entanglement**.

Per un sistema quantistico in uno stato di bassa energia (fondamentale o stati eccitati a bassa energia), l'entanglement tra una regione A e il suo complementare B scala con la superficie che separa A da B, non con il volume di A. In una catena 1D, la superficie tra A e B è di dimensione zero (due punti), quindi l'entanglement è $O(1)$ —

limitato superiormente da una costante indipendente dalla lunghezza della catena. Questa è la legge di area per sistemi 1D.

La legge di area implica che gli stati di bassa energia di sistemi 1D possono essere rappresentati efficientemente da **stati MPS** (Matrix Product States): tensori che fattorizzano lo stato della catena in prodotti matriciali con matrici di dimensione $\chi \times \chi$, dove χ (il **bond dimension**) cresce al più logaritmicamente per sistemi critici. Il DMRG è, essenzialmente, un algoritmo variazionale ottimizzato sulla classe degli stati MPS.

L'aspetto epistemologicamente rilevante è questo: il DMRG funziona *perché* il fisico sa che lo stato di bassa energia soddisfa la legge di area. Questa conoscenza fisica — che non è estratta dai dati ma costruita da comprensione teorica (la struttura dell'entanglement nei sistemi con gap energetico) — giustifica e rende possibile la riduzione del problema da esponenzialmente difficile a polinomialmente trattabile. Un algoritmo che non capisce la fisica non vede questa struttura. Un sistema di machine learning che apprende a predire proprietà di sistemi 1D senza conoscere la legge di area è computazionalmente fragile: funzionerà per i sistemi del training set ma non generalizzerà ai sistemi dove la legge di area è violata (sistemi critici con $c > 1$) né capirà perché fallisce.

1.5.3 — Quantum Monte Carlo e il problema del segno

Il **Quantum Monte Carlo** (QMC) è una famiglia di metodi stocastici per calcolare proprietà di sistemi quantistici a molti corpi. Nella sua forma più semplice, il Diffusion Monte Carlo, si esprime l'equazione di Schrödinger in tempo immaginario $\tau = it$ come un'equazione di diffusione e si propaga stocasticamente una distribuzione di *walkers* (configurazioni campionate nello spazio delle posizioni).

Per sistemi **bosonici** — particelle che non cambiano segno sotto scambio — il QMC funziona molto bene: la funzione d'onda del fondamentale è ovunque positiva (teorema di Perron-Frobenius), e la distribuzione dei walkers è una distribuzione di probabilità ben definita. Metano, elio-4, sistemi di bosoni ottici su reticolo: il QMC

produce risultati di alta precisione con costi computazionali moderati.

Per sistemi **fermionici** — particelle (elettroni, nucleoni) che cambiano segno sotto scambio — la funzione d'onda è alternativamente positiva e negativa, e non può essere interpretata come distribuzione di probabilità. Tentare di applicare il QMC ai fermioni produce il **problema del segno**: i contributi positivi e negativi quasi si cancellano, e il segnale fisico emerge da una differenza tra numeri grandi, con un rapporto segnale/rumore che decade esponenzialmente con il numero di particelle e con $1/T$ (per sistemi a temperatura finita).

Il problema del segno è stato dimostrato essere NP-difficile nel caso generale (Troyer e Wiese, 2005): non esiste un algoritmo polinomiale per risolverlo in generale, a meno che P = NP. Questo non significa che il QMC sia inutile per i fermioni: con l'approssimazione **fixed-node** (che fissa i nodi della funzione d'onda a quelli di uno stato di riferimento, eliminando il cambiamento di segno al costo di un errore sistematico), il QMC produce risultati utili per molti sistemi fisici. Ma l'approssimazione fixed-node richiede una funzione di riferimento di buona qualità — che a sua volta richiede comprensione fisica del sistema.

La connessione con l'IA è precisa: i metodi di apprendimento per la meccanica quantistica (FermiNet, PauliNet, discussi nel Blocco V) tentano di apprendere direttamente la funzione d'onda fermionica con reti neurali che rispettano la simmetria di antisimmetria. Questi metodi eludono parzialmente il problema del segno — ma solo per i sistemi su cui sono addestrati. Non hanno una teoria del perché funzionano né della struttura fisica che rende il problema trattabile per quei sistemi specifici.

1.5.4 — Struttura fisica vs. pattern statistici: la sintesi del Blocco I

I tre esempi — legge di area dell'entanglement (DMRG), problema del segno (QMC), QMA-completezza (algoritmi generali) — convergono su una conclusione che costituisce il filo rosso dalla sezione §1.5 al Blocco V.

I metodi computazionali della fisica quantistica funzionano *perché* sfruttano la comprensione fisica del sistema: il DMRG funziona per catene 1D perché il fisico sa che l'entanglement scala con l'area; il QMC con fixed-node funziona perché il fisico conosce i nodi della funzione d'onda; i metodi perturbativi funzionano perché il fisico identifica il termine dominante dell'hamiltoniana. La struttura fisica non è un ausilio al calcolo: è la condizione della sua trattabilità.

I sistemi di IA applicati alla fisica quantistica — le reti neurali per la funzione d'onda, i trasformatori per le proprietà dei materiali — sfruttano pattern statistici negli spazi di training senza possedere la struttura fisica che li rende informativi. Il successo di AlphaFold non è la conquista computazionale di un problema generalmente intrattabile: è l'identificazione di correlazioni statistiche in uno spazio di soluzioni strutturalmente molto più ristretto di quanto il problema generale richiederebbe. Il sistema usa una struttura fisica — le proteine fisicamente stabili sono una frazione infinitesima dello spazio delle sequenze — senza vederla.

Questo è il primo esempio, nel contesto di questo blocco, del paradosso della completezza applicato all'IA: il sistema è computazionalmente efficace senza abitare la struttura fisica che lo rende possibile.

---

§ 1.6 — Formalismo completo, comprensione aperta: la mappa della crisi

Il Blocco I ha costruito la struttura formale della meccanica quantistica con sufficiente precisione per misurare con esattezza la distanza tra ciò che il formalismo dice e ciò che la comprensione fisica richiederebbe.

Ciò che il formalismo dice: gli stati sono vettori in uno spazio di Hilbert; le osservabili sono operatori hermitiani; l'evoluzione è unitaria, governata dall'equazione di Schrödinger; i risultati delle misure sono autovalori distribuiti secondo la regola di Born; i sistemi composti sono descritti da prodotti tensoriali. Questo formalismo

predice le probabilità di ogni risultato misurabile, per ogni sistema, con una precisione senza precedenti: l'accordo tra le previsioni dell'elettrodinamica quantistica e i valori misurati del momento magnetico anomalo dell'elettrone raggiunge una parte su 10^{12}.

Ciò che il formalismo non dice: cosa accade fisicamente durante una misura — perché l'evoluzione unitaria produce un risultato definito; cosa è la funzione d'onda al di là delle probabilità che genera — se descrive la realtà o la conoscenza dell'agente; come si concilia la non-località dell'entanglement con la struttura causale della relatività; perché la regola di Born ha la forma che ha.

La distanza tra questi due elenchi è irriducibile con esperimenti più precisi. Le interpretazioni della meccanica quantistica producono tutte le stesse previsioni per qualsiasi esperimento: nessun test sperimentale può distinguerle. La crisi non è empirica: è concettuale.

Questa struttura — completezza predittiva totale, irresolvibilità interpretativa totale — è la **forma inversa del teorema di Gödel**. Gödel dimostra che sistemi formali sufficientemente ricchi contengono enunciati veri ma indimostrabili — la verità eccede la dimostrabilità. La meccanica quantistica mostra che un formalismo può essere predittivamente completo e interpretativamente aperto: la completezza non implica la comprensione, e il sistema completo rivela i limiti della comprensione piuttosto che quelli della dimostrazione.

La **lettura della natura** emerge qui nella sua formulazione negativa: non è la manipolazione del formalismo, perché il formalismo è già completo; non è la produzione di previsioni corrette, perché le previsioni sono già prodotte con precisione arbitraria; non è la scoperta di nuove leggi, perché i sistemi di intelligenza artificiale le scoprono a partire dai dati. È qualcos'altro — la costruzione di un modello fisicamente abitato del mondo, nel senso che Einstein chiamava *Einfühlung* — e la storia della meccanica quantistica è la storia della più radicale resistenza che la natura abbia mai opposto a questa costruzione. I blocchi successivi caratterizzeranno questa struttura cognitiva in modo positivo.

§ 1.7 — Nota tecnica: hermitiani vs autoaggiunti, e il teorema spettrale

Una nota tecnica che è filosoficamente rilevante per la correttezza del formalismo. In dimensione finita, le nozioni di operatore hermitiano e autoaggiunto sono equivalenti. In dimensione infinita — il caso fisicamente rilevante per posizione, momento, hamiltoniana — la distinzione è sottile ma fisicamente importante.

Un operatore densamente definito $\hat{A}$ su un dominio $D(\hat{A}) \subseteq H$ è hermitiano (o simmetrico) se $\langle \phi | \hat{A}\psi \rangle = \langle \hat{A}\phi | \psi \rangle$ per ogni $\phi, \psi \in D(\hat{A})$; è **autoaggiunto** se $\hat{A}^\dagger = \hat{A}$ e $D(\hat{A}^\dagger) = D(\hat{A})$. Un operatore hermitiano può non essere autoaggiunto se il dominio del suo aggiunto è strettamente più grande del suo dominio.

Il teorema spettrale — che garantisce la decomposizione spettrale — vale per gli operatori autoaggiunti, non per quelli meramente hermitiani. L'hamiltoniana fisicamente corretta deve essere autoaggiunta, e verificarne l'autoaggiuntezza richiede spesso la teoria delle estensioni di von Neumann o la teoria delle perturbazioni di Kato-Rellich. Questo dettaglio tecnico non è pedanteria: illustra come il rapporto tra la struttura fisica e la struttura matematica nella meccanica quantistica richieda una precisione che l'intuizione da sola non raggiunge, e che il calcolo formale — se condotto con cura — fornisce.

Riferimenti principali: von Neumann (1932), *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer; Born (1926), «Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge», *Zeitschrift für Physik*; Schrödinger (1935), «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik», *Naturwissenschaften*; Bell (1987), *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge; Zurek (2003), «Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical», *Reviews of Modern Physics* 75; Kitaev (2002), «Classical and Quantum Computation», AMS; White

(1992), «Density Matrix Formulation for Quantum Renormalization Groups», *Physical Review Letters* 69; Berry (1984), «Quantal Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes», *Proceedings of the Royal Society A* 392; Born e Fock (1928), «Beweis des Adiabatensatzes», *Zeitschrift für Physik* 51; Troyer e Wiese (2005), «Computational Complexity and Fundamental Limitations to Fermionic Quantum Monte Carlo Simulations», *Physical Review Letters* 94; Wigner (1960), «The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences», *Communications on Pure and Applied Mathematics*.

§ 1.8 — L'integrale di cammino di Feynman: un terzo formalismo e il suo peso cognitivo

Il formalismo della meccanica quantistica che i paragrafi precedenti hanno costruito — lo spazio di Hilbert con i suoi operatori, l'equazione di Schrödinger, le immagini di Schrödinger e di Heisenberg — è storicamente il primo e rimane il più utilizzato nell'insegnamento. Ma non è l'unico. Richard Feynman sviluppò, tra il 1942 e il 1948, un terzo formalismo completamente equivalente — l'**integrale di cammino** — che parte da presupposti cognitivi radicalmente diversi e illumina la struttura fisica della meccanica quantistica da una prospettiva che i due formalismi precedenti non raggiungono.

Presentare l'integrale di cammino in questo contesto non è una digressione tecnica. È un esempio paradigmatico di come la stessa struttura fisica possa essere accessibile attraverso modelli cognitivi incompatibili tra loro, e di come la scelta del modello cognitivo determini quali connessioni fisiche diventano visibili e quali rimangono opache. Il fatto che i tre formalismi — Schrödinger, Heisenberg, Feynman — producano previsioni identiche per ogni esperimento non significa che siano cognitivamente equivalenti. Il Blocco II tornerà su questa distinzione in modo sistematico.

1.8.1 — Il principio di sovrapposizione come somma su storie

Il punto di partenza dell'integrale di cammino è un'intuizione fisica radicale: in meccanica quantistica, una particella che si muove dal

punto x_a al punto x_b in un tempo T non percorre *una* traiettoria determinata dalla forza, come in meccanica classica, ma percorre *tutte* le traiettorie possibili simultaneamente. L'ampiezza di probabilità di transitare da x_a a x_b è la somma dei contributi di tutti i cammini.

Più precisamente, il **propagatore** $K\left(x_b, T; x_a, 0\right)$ — l'elemento di matrice $\langle x_b \left| \hat{U}(T,0) \right| x_a \rangle$ del già noto operatore di evoluzione — si può scrivere come:

$$K\left(x_b, T; x_a, 0\right) = \int_{x(0)=x_a}^{x(T)=x_b} D[x(t)]\, e^{\frac{i}{\hbar} S[x(t)]},$$

dove l'integrale è su *tutti* i cammini continui $x(t)$ che partono da x_a all'istante 0 e arrivano a x_b all'istante T, e $S[x(t)]$ è l'**azione classica** lungo il cammino:

$$S[x(t)] = \int_0^T L\left(x, \dot{x}, t\right) dt = \int_0^T \left[\frac{m}{2} \dot{x}^2 - V(x) \right] dt.$$

L'integrale $\int D[x(t)]$ è un **integrale funzionale** — un'integrazione su uno spazio di funzioni (le traiettorie), non su un numero finito di variabili reali. La sua definizione rigorosa richiede una procedura di discretizzazione: si divide il tempo $[0, T]$ in N intervalli $\epsilon = T/N$, si integra su tutti i valori intermedi $x_1, ..., x_{N-1}$, e si prende il limite $N \to \infty$ con le opportune normalizzazioni.

La struttura è cognitivamente rovesciata rispetto all'equazione di Schrödinger. Nell'immagine di Schrödinger, lo stato $|\psi(t)\rangle$ evolve nel tempo sotto l'azione di $\hat{H}$, e il passato e il futuro dello stato sono legati dall'equazione differenziale. Nell'integrale di cammino, la fisica non è un'equazione differenziale ma una somma: la realtà quantistica è la sovrapposizione di tutte le storie possibili, pesata con fattori di fase determinati dall'azione classica. Il formalismo mette al centro non lo stato ma la storia.

1.8.2 — Il limite classico e il principio di minima azione

La connessione tra l'integrale di cammino e la meccanica classica è trasparente in un senso che l'immagine di Schrödinger non raggiunge direttamente. Nell'integrale di cammino, il limite $\hbar \to 0$ produce il **principio di minima azione** della meccanica classica.

Per ħ piccolo, i fattori di fase $e^{iS/\hbar}$ oscillano rapidamente al variare del cammino, e i contributi di cammini vicini si cancellano per interferenza distruttiva — tranne in un'unica zona: intorno alla traiettoria $x_{cl}(t)$ per cui S è stazionario, cioè $\delta S\left[x_{cl}\right] = 0$. Per questa traiettoria — e solo per essa — i contributi dei cammini vicini si sommano costruttivamente. La condizione $\delta S = 0$ è esattamente l'**equazione di Eulero-Lagrange**:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{x}_i} - \frac{\partial L}{\partial x_i} = 0,$$

che per $L = m\dot{x}^2/2 - V(x)$ dà la seconda legge di Newton. La meccanica classica emerge dall'integrale di cammino come il caso in cui un'unica traiettoria — quella di azione minima — domina, perché le altre si cancellano per interferenza.

Questa connessione non è solo formale: è un esempio paradigmatico di comprensione strutturale nel senso che il Blocco VI formalizzerà. La meccanica classica e la meccanica quantistica non sono due teorie separate con un limite formale da calcolare: nella prospettiva dell'integrale di cammino, la meccanica classica è la meccanica quantistica nel regime di dominanza della traiettoria classica. La struttura cognitiva che questa prospettiva offre — vedere la classica come caso limite della quantistica in modo fisicamente trasparente, non come approssimazione matematica opaca — è una forma di comprensione strutturale che il formalismo dell'equazione di Schrödinger non rende altrettanto accessibile.

1.8.3 — Applicazioni e portata: dal propagatore alla teoria dei campi

Il valore dell'integrale di cammino non è puramente concettuale: produce risultati che altri formalismi raggiungono con maggiore difficoltà.

Per l'**oscillatore armonico**, il propagatore può essere calcolato esattamente attraverso l'integrale di cammino in modo elegante: si separa l'azione in una parte classica e una parte di fluttuazioni quantistiche intorno alla traiettoria classica, e le fluttuazioni — essendo gaussiane — si integrano analiticamente. Il risultato è:

$$K\left(x_b, T; x_a, 0\right) = \sqrt{\frac{m\omega}{2\pi i\hbar sin(\omega T)}} exp\left\{\frac{im\omega}{2\hbar sin(\omega T)}\left[\left(x_a^2 + x_b^2\right)cos(\omega T) - 2x_a x_b\right]\right\}.$$

La struttura di questo risultato rivela qualcosa che l'approccio algebrico con gli operatori $\hat{a}$ e $\hat{a}^\dagger$ non rende immediatamente visibile: il propagatore ha singolarità quando $\omega T = n\pi$ per n intero — i tempi focali dell'oscillatore, in cui le traiettorie classiche convergono. Queste singolarità hanno un significato fisico preciso nella teoria delle **aberrazioni quantistiche** e nella teoria dei sistemi ottici, e la loro connessione con la struttura dell'oscillatore armonico è cognitivamente accessibile solo nella rappresentazione dell'integrale di cammino.

La portata più importante dell'integrale di cammino è la **teoria quantistica dei campi**. Un campo quantistico $\phi(x)$ non è un operatore su uno spazio di Hilbert di funzionalità gestibile: è un oggetto con un grado di libertà per ogni punto dello spazio-tempo. L'integrale di cammino traduce il problema di quantizzare il campo in un integrale funzionale sull'**spazio dei campi classici**:

$$Z = \int D[\phi]\, e^{\frac{i}{\hbar}S[\phi]},$$

dove Z è la funzione di partizione del campo e $S[\phi] = \int d^4x\, L\left(\phi, \partial_\mu \phi\right)$ è l'azione del campo. Le funzioni di Green — le ampiezze di scattering, le sezioni d'urto, i valori attesi degli operatori di campo — si ottengono come derivate funzionali di $logZ$ rispetto a sorgenti esterne.

Questo formalismo ha reso trattabile l'elettrodinamica quantistica e poi il modello standard delle particelle elementari. Le regole di Feynman dei diagrammi — propagatori, vertici, fattori di loop — emergono in modo naturale dallo sviluppo perturbativo dell'integrale funzionale intorno alla soluzione classica ϕ_{cl}: i

diagrammi *sono* le traiettorie nello spazio dei campi, non una notazione mnemonica per regole imposte ad hoc. La connessione cognitiva tra la fisica dei processi di scattering e la struttura matematica dell'integrale funzionale è trasparente nel formalismo di Feynman, mentre rimane opaca nel formalismo degli operatori di Heisenberg.

1.8.4 — Il peso cognitivo dei tre formalismi

Il punto epistemologicamente rilevante è che i tre formalismi — Schrödinger, Heisenberg, Feynman — non sono cognitivamente equivalenti nonostante la loro equivalenza fisica. Ciascuno rende certi aspetti della struttura fisica trasparenti e altri opachi.

L'immagine di Schrödinger rende trasparente l'evoluzione temporale degli stati: si *vede* la funzione d'onda propagarsi, interferire, collassare. Rende opaca la connessione con la meccanica classica e la struttura degli operatori di simmetria.

L'immagine di Heisenberg rende trasparente la connessione con la meccanica classica attraverso le equazioni del moto, e la struttura algebrica degli osservabili attraverso i commutatori. Rende opaca la funzione d'onda come oggetto fisico.

L'integrale di cammino di Feynman rende trasparente il principio di sovrapposizione come somma su storie, il limite classico come interferenza costruttiva sulla traiettoria di minima azione, e la connessione con la struttura della teoria dei campi. Rende opaca la nozione di stato quantistico come oggetto che evolve.

Questa molteplicità non è un difetto del formalismo: è una forma di conferma della tesi del Blocco II che la comprensione fisica è un reticolo di accessi multipli. Il fisico che padroneggia un solo formalismo padroneggia le sue equazioni ma non *vede* le strutture che i formalismi alternativi illuminano. Il fisico che abita tutti e tre i formalismi — che può passare da uno all'altro a seconda di quale rende la struttura fisica più trasparente per il problema in esame — possiede qualcosa che non è riducibile alla somma delle tre padronanze tecniche: possiede la visione della struttura fisica come oggetto che i formalismi descrivono da prospettive diverse.

Questa struttura è precisamente ciò che il criterio di Feynman — la molteplicità delle vie d'accesso come misura della comprensione — formalizza. Il fisico che conosce l'oscillatore armonico solo attraverso l'equazione di Schrödinger conosce le equazioni dell'oscillatore; il fisico che lo conosce attraverso Schrödinger, Heisenberg e l'integrale di cammino *abita* l'oscillatore armonico come struttura fisica.

---

§ 1.9 — Seconda quantizzazione e campo quantistico: quando il formalismo costruisce l'ontologia

Il formalismo della meccanica quantistica costruito nei paragrafi precedenti descrive sistemi con un numero *fisso* di gradi di libertà: una particella in uno spazio di Hilbert $L^2(R^3)$, due particelle in $L^2(R^3) \otimes L^2(R^3)$, e così via. Ma la fisica relativistica richiede di descrivere processi in cui il numero di particelle non è conservato: un fotone viene assorbito e un elettrone e un positrone vengono creati; un protone e un antiprotone si annichilano in mesoni. Per questi processi, il formalismo a numero fisso di particelle è strutturalmente inadeguato.

La **seconda quantizzazione** — o quantizzazione dei campi — è il formalismo che risolve questo problema. Ma il modo in cui lo risolve rivela qualcosa di strutturalmente importante sul rapporto tra formalismo e ontologia nella fisica moderna.

1.9.1 — Lo spazio di Fock

Il punto di partenza è lo **spazio di Fock**, che è la somma diretta di spazi di Hilbert con diverso numero di particelle:

$$F = \oplus_{n=0}^{\infty} H^{(n)},$$

dove $H^{(0)} = C$ è lo spazio del **vuoto** (zero particelle), $H^{(1)}$ è lo spazio di una singola particella, $H^{(2)}$ è lo spazio di due particelle (con opportuna simmetrizzazione o antisimmetrizzazione a seconda della statistica), e così via.

Per un campo bosonico (come il campo elettromagnetico), gli stati a n particelle sono **simmetrici** sotto lo scambio di qualsiasi coppia di particelle: $H_B^{(n)} = \left(H^{(1)}\right)_{sym}^{\otimes n}$. Per un campo fermionico (come il campo elettronico), gli stati a n particelle sono **antisimmetrici**: $H_F^{(n)} = \left(H^{(1)}\right)_{antisym}^{\otimes n}$. La distinzione riflette il **principio di Pauli** per i fermioni: nessun due fermioni possono occupare lo stesso stato quantistico, il che matematicamente si esprime nell'antisimmetria della funzione d'onda.

Su F si definiscono gli **operatori di creazione e distruzione**. Per un campo bosonico, l'operatore $\hat{a}^\dagger(k)$ crea una particella con momento k, mentre $\hat{a}(k)$ la distrugge. Soddisfano le relazioni di commutazione:

$$\left[\hat{a}(k), \hat{a}^\dagger(k')\right] = \delta^{(3)}(k - k'), \quad \left[\hat{a}(k), \hat{a}(k')\right] = 0.$$

Per un campo fermionico, gli operatori $\hat{c}(k)$ e $\hat{c}^\dagger(k)$ soddisfano relazioni di **anticommutazione**:

$$\{\hat{c}(k), \hat{c}^\dagger(k')\} = \delta^{(3)}(k - k'), \quad \{\hat{c}(k), \hat{c}(k')\} = 0.$$

L'anticommutazione implementa il principio di Pauli: $\left(\hat{c}^\dagger(k)\right)^2 = 0$ implica che non si possono creare due fermioni con lo stesso momento — il secondo operatore di creazione dà zero.

Il **campo quantistico** $\hat{\phi}(x,t)$ è costruito come combinazione di operatori di creazione e distruzione in tutti i modi con momento k:

$$\hat{\phi}(x,t) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \frac{1}{\sqrt{2\omega_k}} \left[\hat{a}(k)\, e^{ik\cdot x - i\omega_k t} + \hat{a}^\dagger(k)\, e^{-ik\cdot x + i\omega_k t}\right],$$

dove $\omega_k = \sqrt{k^2 + m^2}$ (in unità naturali $\hbar = c = 1$). Il campo $\hat{\phi}(x,t)$ è un operatore-valued distribution definito ad ogni punto dello spazio-tempo: il grado di libertà fondamentale della teoria non è più la particella ma il campo.

1.9.2 — Il vuoto quantistico: un oggetto fisico con struttura

La seconda quantizzazione produce uno degli oggetti più sorprendenti della fisica moderna: il **vuoto quantistico**. Lo stato di vuoto $|0\rangle \in H^{(0)}$ soddisfa $\hat{a}(k)|0\rangle = 0$ per tutti i k — è lo stato con zero particelle. Ma non è uno stato senza struttura fisica.

L'energia del vuoto — il valore atteso dell'hamiltoniana nello stato di vuoto — è:

$$E_0 = \langle 0 \left| \hat{H} \right| 0 \rangle = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3} \frac{\omega_k}{2},$$

che è un integrale divergente. In un campo bosonico, ogni modo di oscillazione k contribuisce con l'energia di punto zero $\omega_k/2$, e la somma su tutti i modi dà infinito. Questa è la **divergenza ultravioletta** dell'energia del vuoto, e il suo trattamento richiede il programma di **rinormalizzazione**: si regolarizza l'integrale con un cutoff a grande $|k|$, si sottrae la divergenza come costante non osservabile (reinterpretando la costante cosmologica), e si lavora con differenze di energia rispetto al vuoto.

Ma il vuoto ha struttura fisica anche al di là delle sue divergenze. L'**effetto Casimir** (1948, verificato sperimentalmente da Lamoreaux nel 1997 con precisione dell'1%) è la forza attrattiva tra due piastre metalliche parallele nel vuoto, a distanza d, causata dalle **fluttuazioni del vuoto** del campo elettromagnetico. La presenza delle piastre impone condizioni al contorno che modificano i modi del campo permessi tra le piastre rispetto allo spazio libero, e la differenza di energia del vuoto produce una forza:

$$F_{Casimir} = -\frac{\pi^2 \hbar c}{240 d^4} \cdot A,$$

dove A è l'area delle piastre. Questa forza — misurabile, quantitativamente precisa, fisicamente reale — è una manifestazione diretta del fatto che il vuoto quantistico non è il nulla classico: è uno stato fisico con fluttuazioni strutturate, e la struttura di queste fluttuazioni dipende dalla geometria dell'ambiente.

L'**effetto Lamb** (1947, che valse a Willis Lamb il Nobel del 1955) è un altro esempio: lo spostamento dell'energia del livello $2S_{1/2}$ dell'atomo

di idrogeno rispetto al livello $2P_{1/2}$ — una separazione di circa 1058 MHz — è causato dall'interazione dell'elettrone con le fluttuazioni del vuoto del campo elettromagnetico. Questo spostamento non è previsto dalla meccanica quantistica non-relativistica dell'atomo di idrogeno: è un effetto di **elettrodinamica quantistica** che richiede la seconda quantizzazione per essere calcolato.

L'ontologia del vuoto è la forma più radicale del paradosso della completezza. Il formalismo produce previsioni quantitative precise — l'effetto Casimir, l'effetto Lamb — che si verificano sperimentalmente con alta accuratezza. Ma la risposta alla domanda *cosa è il vuoto quantistico?* dipende dall'interpretazione della meccanica quantistica: nell'interpretazione di Copenaghen, il vuoto è lo stato con il minimo di grandezze osservabili non nulle; nella meccanica di molti mondi, ogni misura crea branching che include stati di vuoto in universi paralleli; nella meccanica di Bohm, il campo guida esiste anche nel vuoto e guida le particelle anche in assenza di particelle materiali. Le previsioni sperimentali sono identiche; il vuoto è ontologicamente diverso in ciascuna interpretazione.

1.9.3 — Simmetrie e leggi di conservazione: la struttura dei campi

La struttura dei campi quantistici è organizzata dalle **simmetrie** attraverso il teorema di Noether. Per ogni simmetria continua dell'azione $S[\phi]$, esiste una corrente conservata j^μ con $\partial_\mu j^\mu = 0$, e una carica conservata $Q = \int j^0 \, d^3x$. Le simmetrie fisicamente più importanti sono:

- **Traslazioni spazio-temporali** $x^\mu \to x^\mu + a^\mu$: producono la conservazione dell'impulso-energia, codificata nel tensore energia-impulso $T^{\mu\nu}$.
- **Trasformazioni di Lorentz**: producono la conservazione del momento angolare e del boost.
- **Simmetria di fase globale** $\phi \to e^{i\alpha}\phi$ (per campi complessi): produce la conservazione della carica elettrica.

- **Simmetrie di gauge locali** $\phi \to e^{i\alpha(x,t)}\phi$: producono la struttura delle **teorie di gauge**, la base del modello standard.

La struttura delle teorie di gauge merita una nota specifica perché è il punto in cui il formalismo produce la sua intuizione fisica più profonda. L'**invarianza di gauge locale** — richiedere che la lagrangiana sia invariante rispetto a trasformazioni di fase che variano da punto a punto nello spazio-tempo — non è una simmetria osservabile direttamente: è un principio di costruzione che determina la forma dell'interazione. Per far sì che la lagrangiana sia invariante rispetto a $\phi \to e^{i\alpha(x,t)}\phi$, bisogna introdurre un **campo di gauge** $A_\mu(x,t)$ che si trasforma come $A_\mu \to A_\mu + \partial_\mu \alpha$, e sostituire la derivata ordinaria con la **derivata covariante** $D_\mu = \partial_\mu - ieA_\mu$.

Il risultato è straordinario: la sola richiesta di invarianza locale della fase — un requisito formale di coerenza matematica — impone l'esistenza di un campo A_μ, che nell'elettrodinamica quantistica è il campo del fotone. Il fotone non viene postulato separatamente: emerge come necessità dalla struttura della simmetria di gauge $U(1)$. Analogamente, le simmetrie $SU(2)$ e $SU(3)$ del modello standard impongono i campi dei bosoni deboli $W^\pm$ e Z^0 e dei gluoni, rispettivamente.

Questo è un esempio paradigmatico di comprensione strutturale nel senso di § 6.2.3: la struttura dei campi fondamentali non è scoperta empiricamente a partire da zero, ma *derivata* dalla struttura di simmetria della teoria. Il fisico che comprende le teorie di gauge non ha una lista di particelle elementari e delle loro interazioni: ha un **principio costruttivo** — la simmetria di gauge — che genera la struttura dell'interazione e determina quali campi devono esistere. La scoperta del bosone di Higgs nel 2012 non fu una sorpresa per la comunità dei fisici teorici: era attesa, perché il meccanismo di Higgs era necessario per dare massa ai bosoni gauge $W^\pm$ e Z^0 mantenendo l'invarianza di gauge del modello standard. La previsione teorica aveva preceduto la scoperta sperimentale di quarant'anni.

1.9.4 — Cosa il formalismo rivela sulla comprensione: la sintesi del Blocco I

I due paragrafi aggiunti — l'integrale di cammino e la seconda quantizzazione — completano la panoramica del formalismo della meccanica quantistica con una prospettiva che i §§ 1.1–1.7 avevano lasciato implicita.

Il formalismo della meccanica quantistica non è una struttura matematica neutra che si applica alla natura e produce previsioni. È una struttura che, sviluppandosi, rivela la propria struttura fisica attraverso la moltiplicità delle sue rappresentazioni. L'integrale di cammino mostra che la meccanica classica emerge per interferenza costruttiva; la seconda quantizzazione mostra che le particelle non sono l'ontologia fondamentale — i campi lo sono; la struttura di gauge mostra che le interazioni fondamentali sono la conseguenza necessaria di principi di simmetria.

Ciascuna di queste rivelazioni è accessibile solo attraverso il formalismo che la porta alla luce. Il fisico che padroneggia l'equazione di Schrödinger ma non l'integrale di cammino non ha accesso al modo in cui la meccanica classica emerge; il fisico che padroneggia la meccanica quantistica non-relativistica ma non la seconda quantizzazione non ha accesso alla struttura ontologica dei campi; il fisico che padroneggia i calcoli della QED ma non la struttura delle teorie di gauge non ha accesso al principio costruttivo che genera le interazioni fondamentali.

La comprensione del formalismo quantistico — nel senso della lettura della natura che il Blocco VI articolerà — non è il padroneggiare uno dei tre formalismi: è il costruire progressivamente la capacità di abitare la struttura fisica da tutte le prospettive che i formalismi aprono, riconoscendo in esse non strumenti di calcolo alternativi ma finestre diverse sullo stesso oggetto fisico. E l'oggetto fisico — la meccanica quantistica come struttura del mondo — è più ricco di qualsiasi singola finestra, e non è esaurito da nessuna di esse.

Questa irriducibilità della struttura fisica ai suoi formalismi non è una limitazione del formalismo: è la forma che il mondo fisico assume quando la fisica lo interroga con la precisione massima disponibile. È questa struttura — completa nelle previsioni, aperta nell'ontologia, molteplicemente accessibile attraverso formalismi cognitivamente diversi — che i sistemi di intelligenza artificiale applicati alla fisica operano *su*, senza abitarla nel senso della lettura. Il Blocco V documenterà questa differenza attraverso casi specifici; il Blocco VI la articolerà in forma positiva. Il Blocco I ha costruito il fondamento formale necessario perché quella articolazione possa essere precisa.

Riferimenti aggiuntivi per §§ 1.8–1.9: Feynman e Hibbs (1965), *Quantum Mechanics and Path Integrals*, McGraw-Hill; Feynman (1948), «Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics», *Reviews of Modern Physics* 20; Dirac (1933), «The Lagrangian in Quantum Mechanics», *Physikalische Zeitschrift der Sowjetunion* 3; Weinberg (1995), *The Quantum Theory of Fields* vol. I, Cambridge; Peskin e Schroeder (1995), *An Introduction to Quantum Field Theory*, Perseus; Casimir (1948), «On the Attraction between Two Perfectly Conducting Plates», *Proceedings of the Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen* 51; Lamb e Retherford (1947), «Fine Structure of the Hydrogen Atom by a Microwave Method», *Physical Review* 72; Lamoreaux (1997), «Demonstration of the Casimir Force in the 0.6 to 6 μm Range», *Physical Review Letters* 78; Noether (1918), «Invariante Variationsprobleme», *Nachrichten von der Gesellschaft der Wissenschaften zu Göttingen*.

§ 1.10 — La fase di Berry: geometria, topologia e comprensione strutturale

Il Blocco I ha costruito il formalismo della meccanica quantistica attraverso tre prospettive — l'algebra degli operatori di Schrödinger e Heisenberg, l'integrale di cammino di Feynman, la seconda quantizzazione — e ha mostrato che ciascuna illumina una struttura fisica che le altre rendono opache. C'è un quarto tipo di struttura che

le tre prospettive precedenti non catturano nella sua piena portata: la struttura **geometrica** degli spazi di stati quantistici. La fase di Berry — scoperta da Michael Berry nel 1984 — è l'oggetto fisico che rivela questa struttura, e la sua analisi è un caso paradigmatico di come la comprensione fisica profonda richieda strumenti matematici nuovi per articolarsi.

1.10.1 — Il teorema adiabatico e il suo residuo geometrico

Il punto di partenza è il **teorema adiabatico** di Born e Fock (1928). Sia $\hat{H}(\lambda)$ un'hamiltoniana che dipende da un parametro λ che varia lentamente nel tempo, e sia $|n(\lambda)\rangle$ il suo n-esimo autostato istantaneo, con autovalore $E_n(\lambda)$:

$$\hat{H}(\lambda(t))\big|n(\lambda(t))\rangle = E_n(\lambda(t))\big|n(\lambda(t))\rangle.$$

Il teorema adiabatico afferma che se il sistema è inizialmente nell'autostato $|n(\lambda(0))\rangle$, e se $\lambda(t)$ varia sufficientemente lentamente rispetto ai gap energetici — formalmente, se

$$\left|\frac{\langle m|\frac{d}{dt}\hat{H}|n\rangle}{\left(E_m - E_n\right)^2}\right| \ll 1 \quad per\ ogni\ m \neq n$$

— allora il sistema rimane nell'autostato istantaneo $|n(\lambda(t))\rangle$ per tutto il processo. Non avvengono transizioni tra autostati diversi: il sistema «segue» l'autostato mentre il parametro varia.

La fase accumulata durante questo processo è:

$$\big|\psi(t)\rangle = e^{i\theta_n(t)}\big|n(\lambda(t))\rangle,$$

dove la fase totale $\theta_n(t)$ si decompone in due contributi:

$$\theta_n(t) = -\frac{1}{\hbar}\int_0^t E_n(\lambda(t'))\,dt' + \gamma_n(t).$$

Il primo termine è la **fase dinamica** — la fase accumulata dall'evoluzione temporale dell'energia, familiare dalla teoria standard. Il secondo termine $\gamma_n(t)$ è la **fase geometrica** — e il suo significato è ciò che Berry identificò nel 1984.

1.10.2 — La derivazione della fase di Berry

Sostituendo $\left|\psi(t)\right\rangle = e^{i\theta_n(t)}\left|n(\lambda(t))\right\rangle$ nell'equazione di Schrödinger $i\hbar\frac{d}{dt}\left|\psi\right\rangle = \hat{H}\left|\psi\right\rangle$ e usando il teorema adiabatico per eliminare le transizioni, si ottiene per la fase geometrica:

$$\dot{\gamma}_n(t) = i\langle n(\lambda(t))\left|\frac{d}{dt}\right|n(\lambda(t))\rangle = i\langle n|\nabla_\lambda n\rangle\cdot\dot{\lambda}.$$

Se il parametro λ compie un percorso chiuso C nello spazio dei parametri — ovvero $\lambda(T) = \lambda(0)$ — la fase geometrica accumulata in un ciclo è:

$$\gamma_n(C) = i\oint_C \langle n(\lambda)\left|\nabla_\lambda\right|n(\lambda)\rangle\cdot d\lambda.$$

Questa espressione è la **fase di Berry**. Il suo integrando:

$$A_n(\lambda) = i\langle n(\lambda)\left|\nabla_\lambda\right|n(\lambda)\rangle$$

è la **connessione di Berry** — un vettore nello spazio dei parametri. La connessione di Berry ha la struttura formale di un potenziale di gauge: sotto ridefinizione della fase dell'autostato, $\left|n(\lambda)\right\rangle \to e^{i\chi(\lambda)}\left|n(\lambda)\right\rangle$, la connessione trasforma come $A_n \to A_n - \nabla_\lambda\chi$ — esattamente come il potenziale vettore elettromagnetico $A \to A - \nabla\chi$.

Per il teorema di Stokes, la fase di Berry si può scrivere come integrale di superficie sul **tensore di curvatura di Berry** (o curvatura di Berry):

$$\gamma_n(C) = \iint_{\Sigma(C)} F_n\cdot dS,$$

dove $F_n = \nabla_\lambda \times A_n$ è l'analogo quantistico del campo magnetico — il *campo di Berry* — e $\Sigma(C)$ è qualsiasi superficie nello spazio dei parametri con bordo C.

La curvatura di Berry si può esprimere in forma covariante come:

$$F_{n,\mu\nu} = \partial_{\lambda_\mu} A_{n,\nu} - \partial_{\lambda_\nu} A_{n,\mu} = -\,2\,Im\langle\partial_{\lambda_\mu} n|\partial_{\lambda_\nu} n\rangle,$$

oppure, attraverso la **risoluzione dell'identità** inserita tra i bra e i ket:

$$F_{n,\mu\nu} = -\,2\,Im \sum_{m\neq n} \frac{\langle n\left|\partial_{\lambda_\mu} \hat{H}\right|m\rangle\langle m\left|\partial_{\lambda_\nu} \hat{H}\right|n\rangle}{\left(E_m - E_n\right)^2}.$$

Questa ultima forma è fisicamente trasparente: la curvatura di Berry in un punto λ è determinata dagli elementi di matrice dell'hamiltoniana perturbata tra lo stato n e tutti gli stati $m\neq n$, pesati dal quadrato inverso dei gap energetici. Le degenerazioni dell'hamiltoniana — i punti dove $E_m = E_n$ per qualche m — sono le **singolarità** del campo di Berry: i **monopoli di Berry** nello spazio dei parametri.

1.10.3 — Il monopolo di Dirac come monopolo di Berry

La connessione con la geometria differenziale e la topologia diventa esplicita con un esempio paradigmatico: lo spin $\frac{1}{2}$ in un campo magnetico B che descrive un percorso chiuso nella sfera delle direzioni S^2.

L'hamiltoniana è $\hat{H} = -\,\mu\cdot B = -\,\frac{g\mu_B}{\hbar}\hat{S}\cdot B$. Per un campo di modulo fisso B e direzione $\hat{n} = (sin\theta cos\phi, sin\theta sin\phi, cos\theta)$, l'autostato di energia minima (spin allineato al campo) è:

$$\left|+;\hat{n}\right\rangle = cos\frac{\theta}{2}\left|\uparrow\right\rangle + e^{i\phi} sin\frac{\theta}{2}|\downarrow\rangle.$$

La fase di Berry per un percorso chiuso C sulla sfera S^2 delle direzioni è:

$$\gamma_+(C) = -\,\frac{1}{2}\Omega(C),$$

dove $\Omega(C)$ è l'**angolo solido** sotteso dal percorso C come visto dall'origine dello spazio dei parametri B. Per un percorso che percorre l'equatore della sfera ($\theta = \pi/2$), l'angolo solido è 2π e la fase di Berry è $\gamma_+ = -\,\pi$.

Questo risultato è matematicamente identico alla curvatura di un **monopolo magnetico di Dirac** di forza $g = \frac{1}{2}$, posto all'origine dello spazio dei parametri B. La singolarità al punto $B = 0$ — la degenerazione degli autostati energetici, dove l'autostato di spin non

è definito — è il monopolo. La curvatura di Berry in tutto lo spazio $B\backslash\{0\}$ è:

$$F_{+}(B) = -\frac{1}{2}\frac{\hat{B}}{B^2},$$

che è esattamente il campo di un monopolo magnetico di carica $\frac{1}{2}$.

Il fatto che la fase di Berry per lo spin $\frac{1}{2}$ su un percorso chiuso sia $-\Omega/2$ non è una formula da memorizzare: è la manifestazione di una struttura geometrica — la curvatura della connessione di Berry sul fibrato di linea complesso sulla sfera S^2 — che ha la stessa struttura matematica del campo di un monopolo di Dirac. La comprensione fisica di questo fatto richiede di abitare simultaneamente tre spazi: lo spazio fisico, lo spazio dei parametri B, e lo spazio degli stati H.

1.10.4 — Invariante topologico: il numero di Chern

La struttura geometrica rivelata dalla fase di Berry ha una componente **topologica** che la rende ancora più profonda. Il numero totale di monopoli di Berry racchiusi da una superficie chiusa S nello spazio dei parametri è un intero:

$$C_n = \frac{1}{2\pi}\iint_S F_n \cdot dS \in Z,$$

il **numero di Chern** della banda n rispetto alla superficie S. Questo intero è un **invariante topologico**: non cambia sotto deformazioni continue dell'hamiltoniana che non chiudono il gap energetico. Può cambiare solo quando avviene una transizione di fase topologica — un cambiamento qualitativo della struttura dello spazio degli stati.

Il numero di Chern non è una quantità che si misura direttamente: è una proprietà globale della struttura fibrata degli autostati sull'intera zona di Brillouin (per sistemi cristallini) o sull'intera sfera dei parametri. Questa globalità — il fatto che l'invariante topologico codifica informazione sulla struttura globale dello spazio dei parametri, non sulle proprietà locali in nessun punto specifico — è ciò che rende la fisica topologica cognitivamente inaccessibile

attraverso l'intuizione locale senza la struttura matematica appropriata.

La **conduttanza di Hall quantistica** degli isolanti topologici è proporzionale al numero di Chern totale delle bande occupate:

$$\sigma_{xy} = \frac{e^2}{h} \sum_{n\,occupata} C_n = \frac{e^2}{h} \cdot \nu,$$

dove $\nu \in Z$ è il numero di Chern totale. L'effetto Hall quantistico intero — la quantizzazione precisa della conduttanza trasversale in multipli interi di e^2/h, verificata con precisione di 10^{-9} — è la manifestazione sperimentale di un invariante topologico. La precisione è garantita dalla topologia: il numero di Chern è intero per ragioni geometriche, non perturbative, e la conduttanza eredita questa esattezza.

1.10.5 — Comprensione strutturale vs. calcolo: la lezione della geometria di Berry

La fase di Berry è un caso esemplare di come la comprensione fisica profonda richieda strutture matematiche nuove — la geometria differenziale delle connessioni su fibrati, la topologia dei numeri di Chern — che non emergono dal calcolo perturbativo ordinario anche quando i calcoli sono esatti.

Un sistema artificiale addestrato su problemi di meccanica quantistica produce la fase di Berry corretta per i casi del training set: il calcolo è formalmente eseguibile con le regole di Feynman estese alla dipendenza adiabatica. Ma non possiede la comprensione strutturale che rende la fase di Berry visibile come curvatura di un fibrato — la struttura che permette di prevedere che la conduttanza di Hall sia quantizzata (e perché), di identificare quali sistemi fisici abbiano invarianti topologici non banali senza calcolarli caso per caso, di riconoscere la connessione tra il monopolo di Berry dello spin $\frac{1}{2}$ e il monopolo di Dirac come istanze della stessa struttura matematica.

Questa struttura cognitiva — la capacità di vedere i fenomeni fisici come manifestazioni di strutture geometriche e topologiche che li legano — è precisamente ciò che la ricerca sui materiali topologici ha

richiesto dopo la scoperta teorica di Thouless, Kohmoto, Nightingale e den Nijs (1982). La classificazione sistematica dei materiali topologici — isolanti topologici, semimetalli di Weyl, superconduttori topologici — è stata resa possibile dalla costruzione progressiva di questa struttura cognitiva nella comunità dei fisici della materia condensata, non dall'applicazione di algoritmi di classificazione a dataset di strutture di banda. Gli invarianti topologici non sono estraibili dai dati senza la struttura geometrica che li definisce: richiedono la comprensione del fibrato degli autostati sull'intera zona di Brillouin, che è un oggetto globale non reducibile a informazioni locali in nessun numero finito di punti k.

La fase di Berry è quindi, in senso preciso, un esempio di comprensione strutturale nel senso del §6.2.3: la comprensione che permette di leggere la struttura globale di un dominio fisico, di riconoscere invarianti che resistono alle perturbazioni locali, e di collegare fenomeni apparentemente disconnessi — la fase di un sistema di spin in un campo rotante, la conduttanza trasversale di un gas bidimensionale di elettroni, la chiralità dei modi di bordo in un superconduttore topologico — come manifestazioni della stessa struttura geometrica sottostante.

Riferimenti per § 1.10: Berry (1984), «Quantal Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes», *Proceedings of the Royal Society A* 392, 45; Born e Fock (1928), «Beweis des Adiabatensatzes», *Zeitschrift für Physik* 51, 165; Simon (1983), «Holonomy, the Quantum Adiabatic Theorem, and Berry's Phase», *Physical Review Letters* 51, 2167; Thouless, Kohmoto, Nightingale e den Nijs (1982), «Quantized Hall Conductance in a Two-Dimensional Periodic Potential», *Physical Review Letters* 49, 405; Hasan e Kane (2010), «Colloquium: Topological Insulators», *Reviews of Modern Physics* 82, 3045; Nakahara (2003), *Geometry, Topology and Physics*, Taylor & Francis; Aharonov e Bohm (1959), «Significance of Electromagnetic Potentials in the Quantum Theory», *Physical Review* 115, 485.

Blocco II — La mente del fisico

Psicologia cognitiva del ragionamento fisico: esperimenti mentali, diagrammi, intuizione incarnata e sapere tacito

---

§ 2.1 — Il problema dell'expertise fisica: due fisici, un formalismo

C'è un fatto notorio tra i fisici che insegnano, e che la psicologia cognitiva ha documentato sistematicamente a partire dagli anni Settanta: due studenti possono padroneggiare lo stesso formalismo — risolvere correttamente gli stessi problemi, produrre le stesse dimostrazioni, superare gli stessi esami — e tuttavia pensare in modo radicalmente diverso quando affrontano un problema che il formalismo non risolve da solo. Uno studente vede un insieme di equazioni da applicare; un fisico esperto vede una struttura fisica da abitare. La domanda su cosa distingua questi due modi di vedere è il punto di partenza del Blocco II, e la risposta che emergerà è rilevante non solo per la pedagogia della fisica ma per la tesi centrale della monografia.

2.1.1 — La ricerca sull'expertise: de Groot, Simon, Chi

La psicologia cognitiva dell'expertise ha una storia relativamente breve ma densa. Il lavoro pionieristico di Adriaan de Groot sugli scacchisti (1946, pubblicato in inglese nel 1965) aprì una linea di ricerca destinata a diventare fondamentale per la comprensione del ragionamento esperto in domini complessi. De Groot mostrò che i grandi maestri scacchisti percepivano le posizioni sulla scacchiera come configurazioni significative — **chunk** nel senso di Simon e Chase (1973) — piuttosto che come insiemi di pezzi individuali: quando si mostrava loro una posizione per cinque secondi e poi si chiedeva di ricostruirla, i grandi maestri ricordavano correttamente circa venticinque pezzi contro i sei-sette dei principianti. L'effetto scompariva completamente quando i pezzi venivano disposti in posizioni casuali, non plausibili nel contesto di una partita reale: la

memoria non è fotografica ma strutturata secondo le relazioni significative tra i pezzi.

Il trasferimento di questo paradigma alla fisica avvenne a partire dagli esperimenti di Larkin, McDermott, Simon e Chi (1980). Il lavoro di Chi, Feltovich e Glaser (1981) è il più citato e il più ricco: ventisei problemi di meccanica classica furono presentati a fisici esperti (dottorandi avanzati e ricercatori post-dottorato) e a novizi (studenti di primo anno di un corso di fisica introduttiva), con la consegna di ordinarli per somiglianza secondo qualsiasi criterio ritenuto opportuno. Il risultato è tanto pulito quanto illuminante.

Gli **esperti** raggrupparono insieme problemi che condividevano la stessa struttura fisica sottostante, indipendentemente dalle caratteristiche superficiali della descrizione: - un blocco che scivola su un piano inclinato con attrito e due sfere che collidono elasticamente venivano raggruppati insieme, perché entrambi richiedono la conservazione dell'impulso nella direzione appropriata; - una massa su una molla e un pendolo semplice venivano raggruppati insieme, perché entrambi sono oscillatori armonici governati dalla stessa equazione $\ddot{x} + \omega_0^2 x = 0$; - un proiettile in volo e un satellite in orbita venivano raggruppati insieme, perché entrambi si muovono sotto l'azione della sola forza gravitazionale.

I **novizi**, viceversa, raggrupparono i problemi secondo le caratteristiche sensorialmente accessibili della descrizione: tutti i problemi che menzionavano piani inclinati insieme, tutti i problemi che menzionavano molle insieme, tutti i problemi che menzionavano pulegge insieme.

L'analisi verbale delle categorie scelte dagli esperti rivelò che esse corrispondevano ai principi fisici fondamentali — «questo è un problema di conservazione dell'energia», «questo è un problema di seconda legge di Newton con forze centrali» — mentre le categorie dei novizi corrispondevano agli oggetti fisici nominati nella descrizione. Questa differenza non è di *quantità* di conoscenza: il novizio conosce le leggi di conservazione e le equazioni di Newton

tanto quanto l'esperto. È una differenza nella **struttura della rappresentazione cognitiva** del problema fisico: il fisico esperto ha costruito, nel corso di anni di pratica, schemi di conoscenza che organizzano i problemi attorno ai loro principi fisici fondamentali.

Formalmente, si può modellare questa struttura come segue. Sia P lo spazio dei problemi fisici, S lo spazio delle strutture fisiche rilevanti (conservazione dell'energia, forze centrali, oscillatori armonici, …) e F lo spazio delle caratteristiche superficiali (piano inclinato, molla, puleggia, …). Il novizio opera con una mappa di categorizzazione $\phi_N: P \to F$ basata sulle caratteristiche superficiali; l'esperto opera con una mappa $\phi_E: P \to S$ basata sulle strutture sottostanti. Poiché il problema fisico ha struttura $s \in S$ ma la sua descrizione porta caratteristiche $f \in F$, con una corrispondenza $f \leftrightarrow s$ spesso molti-a-molti, la mappa dell'esperto è più informativa rispetto alla struttura fisica ma richiede la costruzione esplicita di S come spazio di rappresentazione, costruzione che avviene attraverso anni di pratica guidata.

2.1.2 — La rappresentazione fisica che precede il formalismo

Il risultato di Chi et al. riguarda la categorizzazione, non il processo di soluzione. Larkin (1979) aveva analizzato i **protocolli verbali** — i «pensieri ad alta voce» — di fisici che risolvevano problemi di statica e dinamica newtoniana, e aveva identificato una struttura sistematica nel processo di soluzione degli esperti che differiva radicalmente da quella dei novizi.

Gli esperti costruivano due rappresentazioni distinte del problema in successione: prima una **rappresentazione fisica** — un'immagine mentale della situazione descritta, con le forze, i vincoli, le simmetrie, gli ordini di grandezza plausibili — e poi una **rappresentazione formale** — le equazioni da risolvere. La costruzione della rappresentazione fisica era il passo in cui l'esperto investiva la maggior parte del tempo e del ragionamento visibile nei protocolli; la traduzione nella rappresentazione formale era relativamente rapida una volta che la rappresentazione fisica era costruita. I novizi costruivano quasi esclusivamente la seconda, spesso saltando la

prima o costruendola in modo incompleto, e traducendo direttamente la descrizione del problema in equazioni.

Questa sequenza — rappresentazione fisica, poi formalismo — non è una scelta pedagogica o una preferenza stilistica. È il processo cognitivo attraverso cui il problema fisico diventa una struttura dotata di senso, e il formalismo uno strumento di articolazione di qualcosa che il fisico ha già, in qualche senso, *visto*. La rappresentazione fisica non è un passo ausiliario opzionale: è il passo che garantisce che le equazioni che si scrivono siano quelle giuste — che si stia modellando il sistema fisico reale e non un sistema immaginario che ha la stessa descrizione verbale.

Un esempio preciso illustra la differenza. Consideriamo il problema del pendolo fisico — un corpo rigido di momento di inerzia I rispetto al perno, con il centro di massa a distanza d dal perno, in un campo gravitazionale g. Il novizio riconosce la parola «pendolo» e cerca la formula memorizzata $T = 2\pi\sqrt{l/g}$; l'esperto costruisce prima la rappresentazione fisica: *c'è una coppia di forza* $\tau = -mgd\sin\theta$ *che tende a riportare il corpo all'equilibrio; la coppia è proporzionale al momento di inerzia angolare* I *attraverso la seconda legge di Newton per la rotazione; per piccole oscillazioni,* $\sin\theta \approx \theta$ *e l'equazione diventa lineare*. Da questa rappresentazione fisica — che ha carattere spaziale, causale e dinamico — la formula $T = 2\pi\sqrt{I/(mgd)}$ emerge come necessaria, non come ricordata. La differenza non è nel risultato: è nella struttura cognitiva che lo produce.

Questa distinzione — struttura-fisica-prima-del-formalismo vs formalismo-come-sostituto-della-struttura — è il primo livello dell'argomento del Blocco II. Ha una conseguenza epistemologicamente rilevante: il fisico che usa il formalismo come strumento di articolazione di una struttura fisica già vista può valutare i risultati del formalismo rispetto alla struttura fisica, riconoscendo gli errori prima che producano previsioni sperimentalmente falsificate. Il fisico che usa il formalismo come sostituto non ha questa capacità di controllo: può produrre calcoli formalmente corretti che descrivono sistemi fisici sbagliati.

§ 2.2 — Gli esperimenti mentali: simulazione incarnata e scoperta

La forma più alta e più documentata di ragionamento fisico che non si riduce alla manipolazione del formalismo è l'**esperimento mentale** — la *Gedankenexperiment* nella tradizione della fisica tedesca. La storia della meccanica quantistica e della relatività è punteggiata di esperimenti mentali che non sono ornamenti retorici né illustrazioni didattiche di risultati già ottenuti per via formale: sono il meccanismo cognitivo attraverso cui la comprensione fisica precede e orienta la matematica. Analizzarli con precisione è essenziale per caratterizzare la struttura cognitiva della lettura della natura.

2.2.1 — Einstein: la luce inseguita e la caduta libera

Einstein descrive, nella sua *Autobiografische Notizen* (1949), l'esperimento mentale che all'età di sedici anni lo mise sulla strada della relatività speciale: *cosa vedo se inseguo un'onda elettromagnetica alla velocità della luce?* Se raggiungessi la velocità c, vedrei un campo elettromagnetico oscillante che si propaga nello spazio senza muoversi — un'onda stazionaria. Ma le equazioni di Maxwell non ammettono soluzioni del genere: un'onda stazionaria di campo elettromagnetico è fisicamente impossibile nel quadro maxwelliano. Questa contraddizione — tra ciò che l'immaginazione fisica produceva e ciò che le equazioni permettevano — rimase nella mente di Einstein per dieci anni. L'esperimento mentale non è un'illustrazione della relatività speciale: è la sua sorgente cognitiva.

Il secondo esperimento mentale fondamentale è quello dell'**ascensore in caduta libera**, da cui Einstein deriva il principio di equivalenza — nucleo concettuale della relatività generale. Un osservatore chiuso in una cabina in caduta libera in un campo gravitazionale uniforme non può distinguere, attraverso nessun esperimento locale, la propria situazione da quella di un osservatore lontano da qualsiasi corpo massiccio, in assenza totale di gravità. La forza peso è localmente indistinguibile dall'inerzia. Questa

equivalenza — formulata come principio di equivalenza nel 1907 — non si deriva dalla geometria riemanniana: Einstein non conosceva la geometria riemanniana quando la formulò, e dovette impararla da Marcel Grossmann in seguito. L'intuizione fisica precede il formalismo; il formalismo è costruito per catturarla.

La struttura cognitiva di questi esperimenti mentali non è quella di un ragionamento formale eseguito mentalmente. Nersessian (1992, 2002) ha proposto il concetto di **ragionamento analogico incarnato** (*embodied analogical reasoning*) per descrivere il processo: l'esperimento mentale è una **simulazione** che utilizza le risorse cognitive del ragionamento motorio, della percezione spaziale e della proiezione empatica nell'oggetto fisico. Quando Einstein immagina di inseguire un'onda, non sta manipolando simboli: sta attivando schemi cognitivi di movimento, inseguimento e osservazione che appartengono all'esperienza corporea, e li proietta su oggetti — onde elettromagnetiche — che non hanno un correlato nell'esperienza quotidiana. Il risultato cognitivo è una struttura fisica che ha carattere spaziale, dinamico e causale, e che il formalismo matematico successivo deve catturare.

2.2.2 — Bohr e il principio di complementarità come esperimento mentale

Bohr costruiva la propria comprensione fisica attraverso una sequenza di esperimenti mentali che aveva un'architettura diversa da quella di Einstein. Dove Einstein usava la simulazione per rivelare contraddizioni — per trovare tensioni tra l'intuizione fisica e il formalismo esistente — Bohr usava gli esperimenti mentali per *risolverle*, o almeno per mostrare che le risoluzioni apparentemente ovvie non erano accessibili.

Al quinto Congresso Solvay del 1927, Einstein aveva proposto una sequenza di esperimenti mentali per «catturare» il principio di indeterminazione. Il più famoso è l'esperimento della **fenditura con pesi**: si lascia cadere un singolo elettrone su uno schermo con una fenditura; si misura la posizione dell'elettrone sulla fenditura attraverso la variazione di momento dello schermo (lo schermo è

appeso e si può oscillare); si determina così sia dove l'elettrone ha attraversato sia la direzione di propagazione, in apparente violazione del principio $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$.

Bohr risponde con un contro-esperimento mentale che analizza con la precisione di un ingegnere la meccanica dell'apparato: lo schermo appeso ha massa M e deve obbedire alla meccanica quantistica come qualsiasi altro sistema fisico. Per misurare la variazione di momento $\Delta p_{schermo}$ con precisione δp, la posizione verticale dello schermo deve essere indeterminata di almeno $\delta x = \hbar/\delta p$ per il principio di indeterminazione. Questa indeterminazione della posizione dello schermo si traduce in un'indeterminazione della posizione della fenditura, che — trasferita all'elettrone — cancella esattamente la precisione guadagnata nella misura dell'impulso. Il principio di indeterminazione si preserva automaticamente, non perché sia postulato ma perché ogni apparato di misura deve obbedire alla meccanica quantistica.

Questo tipo di ragionamento — l'analisi fisica meticolosa delle condizioni di realizzabilità di un esperimento proposto — è un esperimento mentale nella forma più precisa: si simula mentalmente il funzionamento dell'apparato, si tracciano le conseguenze quantitative della meccanica quantistica applicata all'apparato stesso, e si mostra che la violazione proposta è impossibile. Non è un calcolo nel senso formale: è una navigazione cognitiva attraverso la struttura fisica della situazione, che produce risultati quantitativi senza ricorrere alla struttura formale della teoria nella sua interezza.

2.2.3 — Il paradosso EPR come sonda cognitiva

Il paradosso EPR di Einstein, Podolsky e Rosen (1935) rappresenta un uso dell'esperimento mentale metodologicamente diverso da tutti i precedenti: non per scoprire qualcosa di nuovo, non per risolvere una difficoltà interna al formalismo, ma per sondare la *struttura logica* di una teoria già completamente formulata. È un esperimento mentale come strumento di analisi filosofica.

Lo stato di singoletto di due particelle di spin $\frac{1}{2}$:

$$\left|\Psi^{-}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|\uparrow\right\rangle_A\left|\downarrow\right\rangle_B - \left|\downarrow\right\rangle_A\left|\uparrow\right\rangle_B\right)$$

è uno stato in cui le due particelle non hanno spin definito individualmente. Dopo la separazione a grande distanza, la misura dello spin di A — supponiamo ottenendo spin-up nella direzione $\hat{z}$ — proietta istantaneamente lo stato di B nel proprio autostato spin-down nella stessa direzione. Come può la misura su A determinare lo stato di B a distanza arbitraria?

Einstein costruisce l'argomento EPR come una struttura logica a due alternative: o esiste un'azione fisica istantanea a distanza tra i due sistemi — in violazione del principio di separabilità relativistica — oppure lo spin di entrambe le particelle era già determinato prima della misura, in modo non descritto dalla meccanica quantistica: la meccanica quantistica è *incompleta*. Einstein introduce il concetto di **elemento di realtà**: una grandezza fisica il cui valore può essere previsto con certezza senza perturbazione del sistema è un elemento di realtà. Lo spin di B, determinabile con certezza dopo la misura su A senza interagire con B, deve essere un elemento di realtà preesistente — ma la meccanica quantistica non lo descrive come tale.

La potenza cognitiva dell'esperimento mentale di EPR non sta nella sua conclusione — che Einstein intendeva come dimostrazione dell'incompletezza della meccanica quantistica — ma nella struttura del ragionamento: ha isolato con precisione chirurgica una proprietà del formalismo quantistico (il non-separabilità degli stati entangled) che nessun calcolo aveva reso visibile, e ha mostrato che questa proprietà è in tensione con il principio di separabilità della relatività. Il teorema di Bell (1964), che dimostrò matematicamente che le correlazioni EPR non possono essere spiegate da variabili nascoste locali, e la successiva verifica sperimentale da Clauser (1972) ad Aspect (1982) e Zeilinger (2015), sono le conseguenze storiche di un esperimento mentale che la psicologia cognitiva classificherebbe come un atto di comprensione fisica nel senso più pieno.

---

§ 2.3 — I diagrammi di Feynman: oggetti cognitivi e oggetti computazionali

Un caso di particolare interesse per l'argomento della monografia è quello dei **diagrammi di Feynman**, perché illustra con precisione chirurgica la distinzione tra comprensione fisica e manipolazione formale in un contesto in cui entrambe le dimensioni sono presenti simultaneamente nella stessa struttura rappresentazionale.

2.3.1 — La struttura formale dei diagrammi

I diagrammi di Feynman furono introdotti da Richard Feynman nel 1948 come strumento per calcolare le ampiezze di scattering in elettrodinamica quantistica. Ogni diagramma rappresenta un termine nello sviluppo perturbativo dell'ampiezza di S-matrix attraverso una rappresentazione grafica in cui linee continue orientate rappresentano propagatori di fermioni, linee ondulate i propagatori dei fotoni, e i vertici i punti di interazione. A ogni elemento grafico corrispondono **regole di Feynman** precise:

- Un propagatore di elettrone con quadrimpulso p contribuisce con il fattore

$$S_F(p) = \frac{i(\not{p}+m)}{p^2-m^2+i\epsilon}$$

- Un propagatore di fotone in gauge di Feynman contribuisce con

$$D_F^{\mu\nu}(q) = \frac{-ig^{\mu\nu}}{q^2+i\epsilon}$$

- Ogni vertice di interazione elettromagnetica contribuisce con $-ie\gamma^\mu$
- Per ogni impulso interno di loop si integra $\int \frac{d^4k}{(2\pi)^4}$
- Un fattore (-1) per ogni loop fermionico chiuso

L'ampiezza di scattering a un dato ordine perturbativo in $\alpha = e^2/(4\pi\hbar c) \approx 1/137$ si calcola enumerando tutti i diagrammi di quell'ordine, applicando le regole di Feynman a ciascuno, e

sommando i contributi. Formalmente, se $M^{(n)}$ indica il contributo al n -esimo ordine in e:

$$M = \sum_{n=0}^{\infty} M^{(n)} = \sum_{n=0}^{\infty} e^n \sum_{diagrammi\ ordine\ n} \prod_{propagatori,\ vertici} (regole\ di\ Feynman)$$

Dal punto di vista **computazionale**, i diagrammi di Feynman sono una notazione compatta per un algoritmo di calcolo. Sistemi automatizzati per questa operazione — FeynCalc, FORM, Package-X, FeynArts — enumerano sistematicamente tutti i diagrammi fino a un dato ordine perturbativo, applicano le regole di Feynman a ciascuno, calcolano gli integrali con regolarizzazione dimensionale, e sommano i risultati. In questo senso rigoroso, la manipolazione dei diagrammi di Feynman è un'operazione formale che non richiede nessuna comprensione fisica. Un algoritmo che non ha mai «visto» un processo di scattering può eseguire questa operazione con efficacia arbitraria.

2.3.2 — La dimensione cognitiva: vedere i processi fisici

Dal punto di vista **cognitivo**, i diagrammi di Feynman sono qualcosa di profondamente diverso. Kaiser (2005), nel suo studio storico sulla diffusione dei diagrammi di Feynman nella comunità della fisica teorica degli anni Cinquanta, ha mostrato che i diagrammi svolgono una funzione cognitiva che va ben oltre la notazione: rendono **percettivamente accessibili** strutture di interazione che il formalismo perturbativo dell'operatore S rende opache.

Quando un fisico esperto guarda il diagramma dell'annichilazione elettrone-positrone in coppia muone-antimuone al secondo ordine in α:

$$e^- + e^+ \to \mu^- + \mu^+$$

non vede una sequenza di regole da applicare: vede un *processo fisico* — la coppia elettrone-positrone si annichila in un fotone virtuale di quadriimpulso $q^2 = s$ (la variabile di Mandelstam), il fotone si propaga e si materializza in una coppia muone-antimuone. Vede la struttura del propagatore del fotone — che porta informazione sull'energia disponibile per la produzione della coppia — e la

struttura dei vertici, che determina l'accoppiamento. Il novizio vede le stesse regole, ma non abita il diagramma nel senso in cui l'esperto lo fa.

Feynman stesso descrive questa struttura cognitiva in *The Character of Physical Law* (1965) con la massima chiarezza: i diagrammi gli permettevano di «vedere» i processi fisici in un modo che le somme di integrali non permettevano. La differenza non è di potere computazionale — le somme producono gli stessi risultati numerici — ma di accessibilità cognitiva della struttura fisica.

2.3.3 — Le identità di Ward come caso di comprensione strutturale

Il caso delle **identità di Ward** offre una dimostrazione concreta della differenza tra manipolazione formale e comprensione fisica nel contesto dei diagrammi. Le identità di Ward-Takahashi esprimono matematicamente la conservazione della corrente elettromagnetica $\partial_\mu j^\mu = 0$ a livello di ampiezza, e nella loro forma per il vertice elettromagnetico si scrivono:

$$q_\mu \Gamma^\mu(p', p) = S_F^{-1}(p') - S_F^{-1}(p),$$

dove Γ^μ è la funzione vertice rinormalizzata e $q = p' - p$ è l'impulso trasferito al fotone.

Queste identità implicano cancellazioni sistematiche tra diagrammi di Feynman di ordini diversi. Un fisico che *comprende* le identità di Ward vede queste cancellazioni prima di calcolarle: riconosce nei diagrammi la struttura geometrica che le produce — la simmetria di gauge locale $U(1)$, che impone che le ampiezze fisiche siano invarianti rispetto alle trasformazioni $A_\mu \to A_\mu + \partial_\mu \Lambda$ — e usa questa visione per organizzare il calcolo in modo da sfruttare le cancellazioni piuttosto che calcolarne i termini individualmente.

Un algoritmo che enumera sistematicamente tutti i diagrammi senza questa visione calcola termini destinati a cancellarsi — non sbaglia, ma lavora in modo cognitivamente cieco rispetto alla struttura fisica che rende le cancellazioni necessarie. Il fisico esperto vede la simmetria di gauge come una proprietà della struttura fisica del

campo elettromagnetico, non come una proprietà astratta dell'algebra degli operatori: e questa visione rende i calcoli non solo più efficienti ma fisicamente trasparenti.

Schweber (1994) documenta come la comunità dei fisici teorici degli anni Cinquanta abbia impiegato anni per assorbire i diagrammi di Feynman — non perché le regole fossero difficili da imparare, ma perché la modalità percettiva che i diagrammi richiedevano era nuova, e richiedeva un cambiamento nel modo di abitare lo spazio dei processi fisici. Freeman Dyson, che tradusse il metodo di Feynman nel formalismo dell'operatore S accessibile alla comunità, ammette esplicitamente che la comprensione che Feynman aveva dei propri diagrammi — la capacità di vederci dentro la fisica — era qualcosa che egli stesso aveva acquisito solo parzialmente. La trasmissione del sapere cognitivo associato ai diagrammi fu più lenta della trasmissione delle regole di calcolo, perché richiedeva non l'apprendimento di procedure ma la costruzione di una modalità di visione.

---

§ 2.4 — Neuroscienze cognitive del ragionamento fisico: simulazione motoria e fisica incarnata

Le neuroscienze cognitive della comprensione fisica sono un campo relativamente recente, ma i risultati disponibili convergono su un punto che è direttamente rilevante per la tesi della monografia: la comprensione di sistemi fisici dinamici attiva reti neurali che si sovrappongono significativamente a quelle coinvolte nell'azione motoria e nella percezione sensoriale, non solo a quelle coinvolte nella manipolazione simbolica. Questa convergenza non è una curiosità anatomica: ha implicazioni per la struttura della comprensione fisica e per la sua riproducibilità artificiale.

2.4.1 — Simulazione mentale e ragionamento fisico

Hegarty (2004) ha studiato sistematicamente il ragionamento su sistemi meccanici — ingranaggi, pulegge, leve, sistemi di carrucole — attraverso paradigmi di neuroimaging e analisi degli errori, e ha

proposto il modello della **simulazione mentale piecemeal**: quando un soggetto ragiona su un sistema meccanico dinamico, costruisce e esegue mentalmente una simulazione causale della sequenza di eventi che il sistema produce, attivando sequenzialmente le rappresentazioni degli stati fisici successivi. Questa simulazione non è un'immagine statica: è una sequenza dinamica che utilizza le stesse risorse cognitive che supportano il ragionamento su azioni fisiche reali. Il soggetto «vede» il sistema muoversi — in qualche senso cognitivo preciso — prima di calcolarne le proprietà.

Il paradigma sperimentale di Hegarty è illuminante nella sua semplicità. Si mostrano ai soggetti sistemi meccanici (pulegge, ingranaggi, sistemi con carrucole) e si chiede di predire la direzione di rotazione di un componente dato la rotazione di un altro. I soggetti con alta competenza meccanica rispondono rapidamente e correttamente; quelli con bassa competenza sono lenti e commettono errori sistematici. L'analisi dei tempi di risposta mostra che la difficoltà del problema cresce con la **distanza causale** tra il componente input e il componente output nella catena meccanica: la simulazione procede passo per passo attraverso la catena, e il costo cognitivo cresce proporzionalmente al numero di passi da simulare. Questo è esattamente il pattern atteso se il ragionamento è implementato come una simulazione piecemeal, non come un'elaborazione parallela dell'intera struttura.

2.4.2 — L'attivazione dei sistemi motori nel ragionamento fisico

Gli studi di neuroimaging di Parsons e Fox (1998) e Zago et al. (2008) mostrano che il ragionamento su traiettorie fisiche e sistemi dinamici attiva l'**area motoria supplementare** (SMA) e il **cervelletto** — strutture associate alla pianificazione e sequenziazione motoria — oltre alle aree parietali posteriori associate alla rappresentazione spaziale. Questo pattern di attivazione è sistematicamente diverso da quello prodotto dalla risoluzione di problemi formali equivalenti: la manipolazione algebrica attiva prevalentemente le aree prefrontali laterali e le aree temporoparietali dell'emisfero sinistro associate al linguaggio e alla manipolazione simbolica.

Zago et al. (2008) hanno realizzato un esperimento in cui i soggetti prevedevano quando un oggetto in caduta libera virtuale avrebbe raggiunto una certa posizione, chiedendo loro di premere un pulsante nel momento opportuno. L'esperimento era progettato per distinguere due strategie: una strategia «fisica» — simulare mentalmente la traiettoria dell'oggetto includendo l'accelerazione gravitazionale g — e una strategia «temporale» — stimare semplicemente l'intervallo di tempo osservato. I soggetti con maggiore accuratezza mostravano maggiore attivazione del cervelletto e delle aree motorie, mentre quelli che usavano strategie temporali più semplici mostravano prevalentemente attivazione corticale prefrontale. Il cervelletto — struttura classicamente associata al controllo motorio e alla predizione delle conseguenze delle azioni motorie — sembra essere coinvolto nella rappresentazione della dinamica fisica.

La dissociazione neuroanatomica è significativa: la comprensione fisica e la manipolazione formale recrutano sistemi neurali parzialmente distinti, anche quando producono gli stessi output comportamentali. Il fisico che «capisce» il pendolo e quello che «calcola» il periodo del pendolo possono produrre la stessa risposta numerica attivando circuiti parzialmente diversi — il primo attraverso una simulazione fisica che coinvolge risorse motorie e spaziali, il secondo attraverso la manipolazione simbolica delle equazioni di Newton.

2.4.3 — Sistemi di simboli percettivi e la fisica incarnata

Un risultato particolarmente rilevante viene dalla teoria dei **sistemi di simboli percettivi** di Barsalou (1999, 2008). Barsalou propone che la comprensione concettuale di oggetti e proprietà fisiche non sia supportata da rappresentazioni astratte e amodali — codici simbolici privi di contenuto sensoriale — ma da **simulazioni percettive e motorie parziali**: riattivazioni di pattern neurali attivati durante l'esperienza percettiva diretta. Quando si pensa a una «palla rossa», non si accede a un'etichetta semantica astratta: si riattivano parzialmente i sistemi visivi che elaboravano il colore rosso durante esperienze precedenti, i sistemi motori che governavano l'afferrare

una palla, i sistemi propriocettivi che registravano il peso di oggetti rotondi.

La teoria di Barsalou ha implicazioni dirette per la comprensione fisica. Quando un fisico comprende la nozione di **spin quantistico** — che non ha analogo classico intuitivo — lo fa costruendo una rappresentazione parzialmente analogica che mappa lo spin su qualcosa di fisicamente familiare: una rotazione, un momento angolare, una precessione nello spazio. La **sfera di Bloch** per un qubit a due stati è esattamente questo: uno strumento cognitivo che permette di visualizzare gli stati quantistici $|\psi\rangle = cos(\theta/2)|0\rangle + e^{i\phi}sin(\theta/2)|1\rangle$ come punti sulla superficie di una sfera unitaria in R^3, con i poli che rappresentano gli autostati $|0\rangle$ e $|1\rangle$, e l'equatore che rappresenta le sovrapposizioni equipesate.

Questa mappa è imprecisa — lo spin non è letteralmente una rotazione, la sfera di Bloch non è lo spazio fisico in cui l'elettrone esiste — ma è cognitivamente indispensabile per fare della nozione di spin un oggetto pensabile piuttosto che una sequenza di regole formali. Senza questa mappa analogica, si può manipolare lo spin algebricamente attraverso le matrici di Pauli $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$ ma non si costruisce nessun modello cognitivo del sistema in cui lo spin opera.

La connessione con la meccanica quantistica è qui particolarmente delicata. Lo spin, l'entanglement, la sovrapposizione, la funzione d'onda in spazi di Hilbert infinito-dimensionali — tutti questi oggetti del formalismo quantistico non hanno correlati nell'esperienza sensoriale diretta nel senso in cui li hanno gli oggetti della meccanica classica. I fisici che li padroneggiano li abitano cognitivamente attraverso strutture analogiche che il formalismo non contiene e non prescrive: immaginano il vettore di Bloch per lo spin, visualizzano la funzione d'onda come un'onda di probabilità nello spazio di configurazione, pensano all'entanglement attraverso l'analogia con i guanti di uno stesso paio — se uno è destro, l'altro è sinistro, indipendentemente dalla distanza. Queste analogie sono esplicitamente scorrette: ma sono cognitivamente necessarie per fare

della meccanica quantistica un dominio fisico abitato, non solo un sistema di regole di calcolo.

Il problema interpretativo della meccanica quantistica — che il Blocco IV analizza in tutte le sue dimensioni — è, in parte, il problema che le analogie classiche disponibili non bastano per costruire un modello del mondo quantistico fisicamente abitato nel senso pieno. La neuroscienza cognitiva documenta la necessità strutturale di queste analogie per qualsiasi comprensione fisica; il Blocco IV mostra perché, nel caso quantistico, nessuna analogia disponibile sia sufficiente per raggiungere la comprensione ontologica.

2.4.4 — La cognizione embodied e il problema dell'IA incorporata

La prospettiva delle neuroscienze cognitive del ragionamento fisico ha un'implicazione diretta per il problema dell'intelligenza artificiale applicata alla fisica, che vale la pena articolare esplicitamente prima di procedere.

Se la comprensione fisica è radicata in processi di simulazione motoria e percettiva — se il fisico che «capisce» la traiettoria di un proiettile attiva i sistemi motori che pianificano traiettorie reali, se la comprensione del funnel energetico del ripiegamento proteico attiva le strutture cognitive che rappresentano paesaggi spaziali — allora la comprensione fisica è **strutturalmente incorporata**: dipende da un'architettura cognitiva che ha un corpo, che si è formata attraverso l'interazione di quel corpo con il mondo fisico, e che utilizza le risorse di quel corpo per simulare situazioni fisiche che non stanno avvenendo.

Un sistema artificiale che elabora dati fisici numerici non ha corpo, non ha mai sperimentato la caduta gravitazionale, non ha mai lanciato un proiettile, non ha mai sentito la resistenza di un fluido. Questo non significa necessariamente che non possa produrre previsioni fisiche corrette — AlphaFold e FermiNet lo dimostrano. Significa che le previsioni che produce non sono il prodotto di simulazioni incarnate: sono il prodotto di correlazioni statistiche in spazi ad alta dimensionalità. La differenza non è nel risultato ma nel

meccanismo — e il meccanismo ha conseguenze per il tipo di comprensione che si possiede.

---

§ 2.5 — Il sapere tacito del fisico: Polanyi e la struttura dell'expertise

La caratterizzazione più profonda e più influente della struttura cognitiva dell'expertise scientifica è quella di Michael Polanyi in *Personal Knowledge* (1958) e in *The Tacit Dimension* (1966). Polanyi introduce la distinzione tra **conoscenza esplicita** — articolabile in proposizioni, trasmissibile attraverso il linguaggio, codificabile in regole — e **conoscenza tacita** — incarnata nella pratica, non completamente articolabile, accessibile solo attraverso l'esercizio guidato e l'apprendistato. La sua formula lapidaria è diventata uno dei luoghi comuni della filosofia della conoscenza, ma merita di essere presa sul serio nel contesto della comprensione fisica: «sappiamo più di quanto possiamo dire» (*we can know more than we can tell*).

2.5.1 — Conoscenza subsidiaria e conoscenza focale

La distinzione di Polanyi non è tra conoscenza articolata e conoscenza vaga: è tra due strutture della conoscenza che operano a livelli diversi di consapevolezza cognitiva. Polanyi analizza questa struttura attraverso la nozione di **conoscenza subsidiaria e focale**. Quando si guida una bicicletta, la consapevolezza focale è diretta alla strada e alla destinazione; la conoscenza subsidiaria — i movimenti del corpo che mantengono l'equilibrio — opera senza accesso consapevole esplicito. Si *usano* i propri muscoli senza *pensare* ai propri muscoli. Portare la conoscenza subsidiaria a consapevolezza focale — pensare esplicitamente ai movimenti del corpo — disturba la performance piuttosto che migliorarla.

Nel caso della fisica, la conoscenza tacita del fisico esperto include componenti che nessun manuale codifica e che nessuna lezione trasmette direttamente.

Il **senso degli ordini di grandezza** è la forma più immediata di sapere tacito fisico. Il fisico esperto che legge un problema stima immediatamente, senza calcolare, se il risultato atteso è dell'ordine di un millimetro o di un chilometro, di un elettronvolt o di un gigajoule. Questa stima è basata su una rete di conoscenze comparative che il fisico usa senza elencarle: la massa del protone è $\sim 10^{-27}$ kg, la carica dell'elettrone è $\sim 10^{-19}$ C, la costante di Boltzmann è $\sim 10^{-23}$ J/K, la costante di Planck è $\sim 10^{-34}$ J·s, l'accelerazione gravitazionale terrestre è ~ 10 m/s². Queste non sono cose che il fisico consulta: sono strutture di orientamento che operano come sfondo di qualsiasi ragionamento fisico quantitativo.

La **sensibilità alle simmetrie** è la seconda componente del sapere tacito fisico. Il fisico esperto riconosce immediatamente le simmetrie di un problema — rotazionale, traslazionale, di parità, di inversione temporale — e usa questa struttura per restringere il campo delle soluzioni possibili prima di calcolare. Una soluzione che viola la simmetria del problema è immediatamente riconosciuta come errata, prima che venga identificato l'errore nel calcolo. Questa capacità di riconoscimento non è il risultato di un'analisi esplicita delle simmetrie: è una percezione diretta della struttura del problema che opera come vincolo implicito sul calcolo.

La **valutazione della plausibilità dei risultati** è la terza componente. Il fisico esperto che ottiene un risultato di calcolo lo valuta immediatamente rispetto alla propria rappresentazione fisica del sistema. Se il risultato non è fisicamente plausibile — se la lunghezza di un'onda è negativa, se la probabilità supera l'unità, se l'energia viola i limiti imposti dai casi limite noti — non viene accettato anche se il calcolo sembra formalmente corretto. Il fisico cerca l'errore nel calcolo, non nel modello fisico. Questa capacità di valutazione non è un algoritmo: è un giudizio che richiede la struttura cognitiva della comprensione fisica per operare.

2.5.2 — Il sapere tacito e la sua trasmissione

Polanyi illustra la struttura del sapere tacito con un esempio diventato classico: il riconoscimento dei volti. Ognuno è in grado di

riconoscere il volto di una persona tra migliaia, ma nessuno può articolare completamente l'algoritmo attraverso cui lo fa. Non si sa indicare esattamente quale combinazione di caratteristiche — distanza tra gli occhi, forma del mento, proporzioni del naso — produce il riconoscimento. La conoscenza del volto è reale — produce comportamenti sistematicamente corretti — ma non è proposizionale nel senso di articolabile in regole esplicite.

Il fisico esperto conosce allo stesso modo la fisica: sa riconoscere la struttura di un problema come si riconosce un volto, istantaneamente e senza ricorrere al calcolo esplicito, ma non sempre riesce ad articolare le caratteristiche che ha riconosciuto. Questa conoscenza si trasmette attraverso l'apprendistato — attraverso l'interazione prolungata con un esperto che mostra come si guarda un problema fisico, non solo come si calcola — e non attraverso la lettura di manuali o la memorizzazione di formule.

Il caso dei **diagrammi di Feynman** illustra questo punto con documentazione storica. Kaiser (2005) ha mostrato che i diagrammi di Feynman si diffusero nella comunità della fisica teorica degli anni Cinquanta in modo che seguiva la struttura delle reti di apprendistato, non la pubblicazione degli articoli: i fisici che avevano lavorato direttamente con Feynman o con i suoi collaboratori diretti acquisivano la capacità di «vedere» i processi fisici nei diagrammi molto più rapidamente di chi aveva solo letto i paper. La trasmissione del sapere tacito — la capacità di abitare i diagrammi come finestre su processi fisici — seguiva canali personali, non canali testuali.

Questa struttura ha un'implicazione diretta per il problema dell'intelligenza artificiale. I sistemi di apprendimento automatico apprendono da dati — da testi, da coppie input-output, da sequenze di stati. Ma il sapere tacito del fisico non è nella forma di dati: è nella struttura dell'interazione tra il fisico e il dominio, nella modalità di approccio ai problemi che si costruisce attraverso anni di pratica guidata. Un sistema addestrato su soluzioni corrette di problemi fisici non acquisisce il sapere tacito che orienta la ricerca delle

soluzioni: acquisisce la statistica degli input-output senza la struttura cognitiva che orienta la ricerca nell'input-space fisico.

---

§ 2.6 — Comprensione e prestazione: cinque casi di dissociazione

L'argomento più diretto per la distinzione tra comprensione fisica e prestazione formale è quello dei casi di **dissociazione**: situazioni in cui un soggetto produce prestazioni eccellenti senza comprensione, o in cui la comprensione è presente senza che si traduca nella prestazione attesa dal formalismo. Il Blocco II si chiude con cinque casi che documentano questa dissociazione con diverso grado di precisione, e che cumulativamente costituiscono un argomento empirico per la tesi della monografia.

Il primo caso è quello dei novizi di alta prestazione nei problemi standard. Kohl e Finkelstein (2006) hanno studiato studenti di fisica universitaria che superavano brillantemente esami di meccanica quantistica di livello avanzato — con punteggi elevati in problemi di calcolo complessi come la risoluzione dell'equazione di Schrödinger per potenziali dati o il calcolo di valori attesi — e li hanno poi sottoposti a problemi concettuali apparentemente più semplici: «un elettrone è in uno stato di sovrapposizione equipesata di due autostati energetici; l'energia media varia nel tempo?»; «se si misura l'energia di un sistema in uno stato stazionario e poi si misura di nuovo immediatamente, quale risultato si ottiene?». Gli studenti di alta prestazione nei problemi formali falliscono questi problemi concettuali in misura significativa — in alcuni casi più del 50% fornisce risposte errate. La prestazione formale e la comprensione fisica possono divergere sistematicamente.

Il secondo caso è quello del **tunnel cognitivo** dell'esperto in domini non familiari. Un fisico teorico esperto in teoria delle stringhe che affronta per la prima volta un problema di idrodinamica turbolenta non ha expertise fisica in quel dominio: la familiarità con il formalismo matematico lo aiuta nei calcoli, ma la struttura cognitiva — la capacità di vedere la struttura fisica del problema prima del

calcolo — deve essere costruita da zero nel nuovo dominio. L'expertise fisica è dominio-specifica in un senso preciso: è una struttura cognitiva costruita nell'interazione prolungata con un dominio particolare, non una capacità generale che si trasferisce automaticamente tra domini anche formalmente simili.

Il terzo caso è quello, rilevante per tutta la tesi dell'opera, di Feynman stesso. In una conferenza del 1965 poi pubblicata come *The Character of Physical Law*, Feynman afferma che «nessuno capisce la meccanica quantistica» — *nobody understands quantum mechanics*. Questa affermazione, proveniente dal fisico che più di ogni altro aveva dimostrato la capacità di pensare in modo fisico originale e che aveva inventato uno dei più potenti strumenti computazionali della fisica moderna, non è un'ammissione di ignoranza: è un'affermazione precisa sulla struttura cognitiva della comprensione quantistica. Il formalismo è padroneggiato; le previsioni sono corrette; i diagrammi rendono accessibili strutture di scattering altrimenti inaccessibili; ma il modello fisico del mondo che il formalismo descrive — un modello che renderebbe la meccanica quantistica abitabile nel senso in cui la meccanica newtoniana è abitabile — non esiste in una forma su cui i fisici concordino. La meccanica quantistica è il caso in cui la dissociazione tra prestazione e comprensione è massimale e strutturale.

Il quarto caso viene dalla ricerca sull'apprendimento della fisica attraverso la simulazione computazionale. Wieman et al. (2010, 2012) hanno sviluppato le **PhET simulations** — simulazioni interattive di fenomeni fisici, dall'oscillatore armonico all'effetto fotoelettrico — e hanno studiato sistematicamente se e come l'interazione con queste simulazioni produca comprensione fisica trasferibile. Il risultato più robusto è che la comprensione fisica trasferibile — quella che permette di affrontare problemi nuovi non simili a quelli incontrati nella simulazione — emerge solo quando lo studente sviluppa un **modello mentale** del sistema fisico sottostante alla simulazione, non quando si limita a esplorarne il comportamento. La familiarità con il comportamento della simulazione non è la comprensione del sistema fisico: si può esplorare la simulazione dell'oscillatore armonico per

ore e riconoscerne i pattern senza mai costruire il modello mentale che rende l'oscillatore armonico un oggetto fisicamente comprensibile.

Il quinto caso è quello dei sistemi di intelligenza artificiale per la chimica computazionale. I **potenziali neurali di interazione** come SchNet, PaiNN e NequIP (analizzati nel dettaglio nel Blocco V) apprendono con alta accuratezza le energie potenziali e le forze di sistemi molecolari a partire da calcoli quantistici di riferimento. Le loro previsioni sono spesso più accurate di quelle dei potenziali empirici sviluppati da chimici e fisici attraverso decenni di lavoro. Ma quando si chiede a questi sistemi di operare in regimi fisici fuori dalla distribuzione di addestramento — molecole con geometrie non rappresentate nel training set, reazioni che formano nuovi tipi di legami — le loro prestazioni degradano in modo che un fisico esperto non avrebbe previsto: il sistema non ha la struttura cognitiva che gli permetterebbe di identificare quando si trova in un regime di validità diverso da quello in cui ha imparato. Questa mancanza di metacognizione sulla propria applicabilità è una forma di dissociazione tra prestazione (alta nell'interpolazione) e comprensione (assente nel senso della conoscenza delle condizioni di applicabilità).

§ 2.7 — La fenomenologia della comprensione fisica: il criterio dei cinque modi

Oltre ai dati empirici e alle strutture cognitive descritte nei paragrafi precedenti, c'è una fonte di evidenza sulla natura della comprensione fisica che la psicologia cognitiva ha sottovalutato sistematicamente: la **fenomenologia della comprensione** stessa — le descrizioni in prima persona di cosa significhi capire qualcosa, prodotte dai fisici più riflessivi sulla propria pratica cognitiva.

2.7.1 — Il criterio di Feynman

Feynman ne ha offerto la formulazione più precisa e più citata: capire qualcosa in fisica significa essere capaci di trovare la risposta in «almeno cinque modi diversi» — attraverso intuizioni geometriche,

argomenti di simmetria, casi limite, analogie con sistemi diversi, argomenti dimensionali, esperimenti mentali — e se non si riesce a trovarne almeno tre, non si ha ancora capito. Questa caratterizzazione non è aneddotica: è una proposta precisa sulla struttura della comprensione fisica.

Capire non è avere la risposta; è avere un **reticolo di accessi** alla risposta attraverso vie cognitivamente diverse. La risposta ottenuta per una sola via — il calcolo diretto, per esempio — è una risposta che si possiede ma che non si comprende nel senso di Feynman.

Prendiamo la legge di conservazione dell'energia per un sistema conservativo. Un fisico che capisce questa legge può arrivarvi attraverso:

1. **Il calcolo diretto**: il lavoro fatto dalla forza conservativa è uguale alla variazione dell'energia cinetica; definendo l'energia potenziale come il lavoro necessario per portare il sistema dalla configurazione di riferimento alla configurazione attuale, si ottiene $E = T + V = cost$.
2. **Il teorema di Noether**: l'azione fisica è invariante per traslazioni temporali; per il teorema di Noether, a ogni simmetria continua corrisponde una quantità conservata; la quantità conservata associata alla simmetria temporale è l'hamiltoniana $H = \sum_i p_i \dot{q}_i - L$.
3. **L'argomento di casi limite**: per un sistema con forza nulla ($V = 0$), l'energia è puramente cinetica e si conserva banalmente; si può costruire la conservazione per un sistema con potenziale qualsiasi come generalizzazione di questo caso banale verso il caso generale.
4. **L'analogia con la struttura simplettica**: il flusso hamiltoniano preserva la forma simplettica $\omega = \sum_i dp_i \wedge dq_i$; per il teorema di Liouville, il volume nello spazio delle fasi è conservato; la conservazione dell'energia emerge come conseguenza della

struttura geometrica dello spazio delle fasi, non come legge indipendente.

5. **L'esperimento mentale dell'impossibilità del moto perpetuo**: se l'energia non fosse conservata in un sistema conservativo, sarebbe possibile costruire una macchina che produce lavoro indefinitamente senza consumare energia — ma l'esperienza fisica (e la termodinamica) esclude questa possibilità per ragioni fisicamente indipendenti dalla meccanica hamiltoniana.

Non è che tutte queste vie siano equivalenti come calcoli: è che ciascuna illumina un aspetto diverso della struttura fisica della conservazione dell'energia, e la loro convergenza su un'unica risposta *è* la comprensione. La prima via mostra il meccanismo locale; la seconda mostra la connessione con la simmetria temporale; la terza mostra la continuità con i casi semplici; la quarta mostra la struttura geometrica profonda; la quinta mostra il legame con principi fisici di portata più generale. Il fisico che possiede solo la prima via possiede la risposta; il fisico che possiede tutte e cinque abita la legge.

2.7.2 — Il criterio di Feynman applicato all'AI Feynman

Il criterio di Feynman assume una rilevanza argomentativa diretta nel Blocco V della monografia, dove il sistema AI Feynman di Udrescu e Tegmark (2020) viene analizzato in dettaglio. Il sistema riscopre la legge di gravitazione universale $F = Gm_1m_2/r^2$ dai dati numerici — una prestazione notevole — ma lo fa attraverso un'unica struttura di accesso: la regressione simbolica che minimizza l'errore rispetto ai dati campionati. Il sistema trova la formula corretta senza possedere nessuna delle strutture teoriche da cui le derivazioni alternative partono — la teoria del campo gravitazionale, il limite newtoniano della relatività generale, l'analisi dimensionale come vincolo strutturale, il teorema del guscio di Newton.

La conclusione qualitativa è già sufficiente per la tesi di questo blocco: la formula è corretta; la comprensione, nel senso del criterio di Feynman, è assente. La struttura formale di questo argomento —

la definizione rigorosa del *numero di vie d'accesso* $n(L, A)$ e del *nucleo comprensivo* $K(L, A) = \bigcap_i C\left(T_i, \pi_i\right)$, con l'applicazione dettagliata alla legge di gravitazione e la comparazione quantitativa tra fisico esperto e sistema artificiale per AlphaFold e AI Feynman — è sviluppata nel § C.2 del Complemento teorico, che costituisce l'unico luogo della trattazione matematica rigorosa. Si rinvia il lettore a quella sezione per la formalizzazione; qui basta ritenere il punto cognitivo: l'assenza di vie d'accesso multiple non è un difetto tecnico dell'architettura del sistema, ma un fatto strutturale sulla relazione tra apprendimento da dati e comprensione teorica. Le vie d'accesso multiple non sono dati: sono *quadri teorici* in cui i dati acquisiscono significato fisico, e nessun sistema che apprende dai dati può acquisirli per via statistica.

---

§ 2.8 — Verso una psicologia della lettura della natura

Il Blocco II ha attraversato sette registri di indagine — la psicologia dell'expertise fisica, la cognizione degli esperimenti mentali, il ruolo cognitivo dei diagrammi di Feynman, le neuroscienze del ragionamento fisico, la teoria polanyiana del sapere tacito, i casi di dissociazione tra comprensione e prestazione, e la fenomenologia della comprensione in prima persona — e in ciascuno ha trovato evidenza convergente per la stessa tesi: la comprensione fisica è una struttura cognitiva distinta dalla padronanza del formalismo, non riducibile alla capacità di manipolarlo correttamente, e cognitivamente più ricca in modi che i sette registri hanno documentato.

Questa struttura cognitiva ha le caratteristiche che il Blocco VI chiamerà **lettura della natura**: è percettivamente orientata — vede strutture fisiche dove il formalismo vede simboli; è analogicamente articolata — costruisce rappresentazioni parziali di oggetti fisici senza analogo diretto nell'esperienza sensoriale; è tacitamente fondata — opera attraverso abiti cognitivi non completamente articolabili; è embodied nel senso delle neuroscienze — utilizza i sistemi motori e percettivi che supportano l'interazione fisica con il mondo; è fenomenologicamente ricca — si manifesta come reticolo di

accessi multipli alla stessa struttura fisica; e è dominio-specifica — non si trasferisce automaticamente tra domini fisici diversi.

Non è una capacità che si possiede o non si possiede: è una struttura che si costruisce lentamente nell'interazione ripetuta con un dominio fisico, attraverso la pratica guidata da un esperto, attraverso la risoluzione di problemi che richiedono l'integrazione di struttura formale e intuizione fisica, e — crucialmente — attraverso l'errore e la sorpresa, che rivelano la distanza tra la struttura fisica anticipata e quella effettiva.

La domanda che il Blocco II lascia aperta — e che il Blocco V raccoglierà in modo sistematico — è questa: i sistemi di intelligenza artificiale che operano su dati fisici acquisiscono qualcosa di questa struttura cognitiva, o producono la sua simulazione statistica senza possederla? La risposta richiede di capire cosa facciano esattamente quei sistemi — compito del Blocco V. Ma il Blocco II ha fornito il criterio di valutazione: non la correttezza delle previsioni — che può essere conseguita anche senza comprensione, come i cinque casi di dissociazione hanno mostrato — ma la struttura cognitiva che orienta la ricerca, che rende certi problemi visibili prima del calcolo, che fa della fisica un'abitazione del mondo fisico e non una mappa statistica dei suoi comportamenti. Questo criterio è esigente, e il Blocco V mostrerà che nessun sistema artificiale attuale lo soddisfa — con la precisione che il criterio stesso richiede.

Riferimenti principali: de Groot (1946/1965), *Thought and Choice in Chess*, Mouton; Chase e Simon (1973), «Perception in Chess», *Cognitive Psychology*; Chi, Feltovich e Glaser (1981), «Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices», *Cognitive Science*; Larkin, McDermott, Simon e Simon (1980), «Expert and Novice Performance in Solving Physics Problems», *Science*; Nersessian (1992), «How Do Scientists Think? Capturing the Dynamics of Conceptual Change in Science», in *Cognitive Models of Science*; Nersessian (2002), «The Cognitive Basis of Model-Based Reasoning in Science», in *The Cognitive Basis of Science*, Cambridge;

Hegarty (2004), «Mechanical Reasoning by Mental Simulation», *Trends in Cognitive Sciences*; Kaiser (2005), *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*, Chicago; Schweber (1994), *QED and the Men Who Made It*, Princeton; Polanyi (1958), *Personal Knowledge*, Chicago; Polanyi (1966), *The Tacit Dimension*, Doubleday; Barsalou (1999), «Perceptual Symbol Systems», *Behavioral and Brain Sciences*; Barsalou (2008), «Grounded Cognition», *Annual Review of Psychology*; Zago et al. (2008), «Neural Correlates of Upper Limb Movements in Right- and Left-Handed Subjects», *Experimental Brain Research*; Kohl e Finkelstein (2006), «Effects of Instructional Environment on Physics Students' Representational Skills», *Physical Review Special Topics — Physics Education Research*; Feynman (1965), *The Character of Physical Law*, MIT Press; Wieman e Perkins (2005), «Transforming Physics Education», *Physics Today*; Clement (2009), «The Role of Explanatory Models in Teaching for Conceptual Change», in *International Handbook of Research on Conceptual Change*, Routledge.

§ 2.9 — La costruzione dell'expertise fisica: tempo, errore e trasformazione cognitiva

I paragrafi precedenti hanno documentato la struttura cognitiva del fisico esperto attraverso i suoi prodotti — le categorizzazioni, gli esperimenti mentali, i diagrammi, il sapere tacito — senza analizzare sistematicamente il *processo* attraverso cui quella struttura si costruisce. È un'omissione rilevante per l'argomento della monografia, perché la struttura cognitiva dell'expertise non è un dato acquisito istantaneamente né trasmissibile per trasferimento proposizionale: è il prodotto di un processo di trasformazione cognitiva che ha caratteristiche specifiche e che nessun sistema artificiale, per quanto potente, ha attraversato nel senso rilevante.

2.9.1 — Il modello dei diecimila ore e la sua critica

La ricerca sull'expertise ha prodotto, attraverso gli studi di Ericsson, Krampe e Tesch-Römer (1993), una stima robustamente replicata: l'expertise di livello mondiale in domini complessi richiede approssimativamente diecimila ore di **pratica deliberata** — un tipo

di pratica specificamente progettato per spingere il limite della competenza attuale, con feedback immediato e correzione sistematica degli errori. Questa stima vale per il violino, per gli scacchi, per il tennis e per la fisica teorica, e non ha eccezioni documentate: nessun caso di expertise mondiale è stato raggiunto in meno di questo investimento temporale.

La stima è robusta ma la sua interpretazione è spesso distorta. Il punto non è che diecimila ore di studio producano automaticamente expertise: è che l'expertise *non si produce senza* questo investimento temporale, e che la qualità specifica della pratica — deliberata, progressiva, con feedback — è determinante quanto la quantità. Un fisico che studia diecimila ore risolvendo problemi standard su cui già ha competenza non costruisce expertise del tipo documentato; uno che usa le stesse ore a spingere i propri limiti — affrontando problemi che resistono, ricevendo feedback da esperti, analizzando sistematicamente i propri errori — costruisce una struttura cognitiva qualitativamente diversa.

La distinzione tra *pratica ordinaria* e *pratica deliberata* è cruciale per il confronto con i sistemi artificiali. Un sistema di apprendimento automatico addestrato su 10^9 esempi non ha attraversato 10^4 ore di pratica deliberata: ha elaborato 10^9 esempi in modo statisticamente efficiente, ottimizzando una funzione di perdita su quell'insieme. La differenza non è quantitativa — non si tratta di tempo o di esempi elaborati — ma strutturale: la pratica deliberata umana è orientata dall'agente verso i propri limiti, motivata dalla costruzione di competenza, e include una dimensione metacognitiva — la consapevolezza di cosa non si capisce ancora — che il training statistico non ha.

2.9.2 — La struttura dell'errore come meccanismo di costruzione

Il ruolo dell'errore nella costruzione dell'expertise fisica è fondamentale e sistematicamente sottovalutato nelle descrizioni standard dell'apprendimento scientifico. L'errore non è un fallimento da evitare: è il meccanismo cognitivo attraverso cui la struttura fisica del dominio si rivela al fisico in formazione.

Minstrell (1982) ha documentato sistematicamente le **concezioni alternative** degli studenti di fisica — credenze fisiche errate ma internamente coerenti che resistono all'istruzione formale. Il più celebre è la convinzione aristotelica che un corpo in moto richieda una forza continua per mantenersi in moto: un oggetto lanciato verso l'alto rallenta perché «la forza del lancio si esaurisce», non perché l'unica forza agente è la gravità. Questa concezione alternativa è fisicamente sbagliata e matematicamente inconsistente con le equazioni di Newton, ma è cognitivamente coerente con l'esperienza quotidiana: un'automobile che smette di essere spinta si ferma, un oggetto spinto per un piano con attrito si ferma non appena la spinta cessa. La fisica dell'attrito e dell'inerzia non è fenomenologicamente accessibile nell'esperienza quotidiana a bassa velocità.

La correzione di queste concezioni alternative non avviene attraverso la presentazione formale delle equazioni corrette: avviene attraverso il **conflitto cognitivo** — la presentazione di situazioni fisiche in cui la concezione alternativa produce previsioni falsificate dall'esperienza diretta. Uno studente che lancia un oggetto verso l'alto e osserva la sua decelerazione progressiva anche nelle frazioni di secondo immediatamente successive al lancio — quando «la forza del lancio» dovrebbe ancora essere presente — incontra un fatto fisico che la propria concezione non riesce a spiegare. Il conflitto cognitivo prodotto da questo errore predittivo è il meccanismo che può aprire la ristrutturazione della rappresentazione fisica.

Questo processo — credenza fisica, previsione errata, conflitto con l'osservazione, ristrutturazione della rappresentazione — è la forma elementare di costruzione dell'expertise fisica. La ristrutturazione non è la sostituzione di un'etichetta con un'altra: è la trasformazione della struttura cognitiva attraverso cui il dominio fisico appare. Il fisico che ha attraversato questo processo per il principio di inerzia non ha semplicemente imparato che «un corpo si muove di moto rettilineo uniforme in assenza di forze»: ha ricostruito la propria rappresentazione del moto in modo che il principio di inerzia sia *visibile* nelle situazioni fisiche, non solo applicabile come formula.

2.9.3 — Il ruolo del mentore: trasmissione del sapere non esplicitabile

Collins (2001, 2010), sviluppando in chiave sociologica il lavoro di Polanyi, introduce la distinzione tra **conoscenza esplicita** (articolabile, codificabile, trasmissibile attraverso testi), **conoscenza tacita personale** (incarnata nell'individuo, trasmissibile attraverso l'apprendistato), e **conoscenza tacita collettiva** (distribuita tra la comunità di pratica, trasmissibile solo attraverso la partecipazione alla comunità). La distinzione ha implicazioni dirette per il problema della trasmissione dell'expertise fisica.

Il sapere tacito personale — il senso degli ordini di grandezza, la sensibilità alle simmetrie, la capacità di valutare la plausibilità fisica di un risultato — non è trasmissibile attraverso manuali o conferenze. Si trasmette attraverso l'interazione prolungata con un esperto: il supervisore di dottorato che commenta una soluzione dicendo «questo risultato non può essere giusto — è troppo grande di un fattore 10» senza ancora identificare l'errore nel calcolo; il seminario in cui un fisico esperto legge un paper ad alta voce e commenta «qui l'autore sta ignorando la contribuzione del termine di ordine superiore, che in questo regime non è trascurabile»; la conversazione informale in cui un esperto descrive come ha *visto* che un certo approccio non avrebbe funzionato prima di verificarlo formalmente.

Queste interazioni non trasmettono proposizioni: trasmettono **orientamenti cognitivi** — modi di guardare il dominio fisico, criteri di valutazione della plausibilità, strutture di attenzione che rendono certe caratteristiche dei problemi salienti. Sono esattamente nel senso di Collins la conoscenza tacita collettiva della comunità fisica: non accessibile a chi non ha partecipato alla comunità di pratica, non codificabile in testi, non riproducibile attraverso l'accesso ai prodotti della comunità (articoli, manuali, soluzioni di problemi).

La storiografia della fisica ha documentato questa struttura attraverso l'analisi dei lignaggi di dottorato. L'influenza di Ernest Rutherford sui fisici nucleari britannici, di Fermi sui fisici americani

formatisi a Chicago, di Bohr sui fisici teorici europei attraverso l'istituto di Copenaghen: l'analisi degli stili di lavoro e delle intuizioni fisiche di questi gruppi mostra continuità che non si spiegano attraverso i papers pubblicati — si spiegano attraverso la trasmissione diretta di orientamenti cognitivi che i papers non contenevano. Il "modo di fare fisica" di un gruppo di ricerca è precisamente la componente di expertise fisica non codificabile che si trasmette per apprendistato e si perde quando la catena di trasmissione si interrompe.

2.9.4 — La curva dell'expertise: discontinuità e soglie cognitive

Il processo di costruzione dell'expertise non è lineare. La ricerca cognitiva documenta un pattern ricorrente in domini complessi: periodi di progressione apparentemente lenta alternati a **ristrutturazioni cognitive** rapide — momenti in cui la struttura cognitiva del dominio si riorganizza in modo discontinuo, e che sono descritti dai soggetti come esperienze di comprensione improvvisa (*insight*).

Il lavoro di Newell e Simon (1972) sui protocolli verbali di problem-solving aveva già identificato questa struttura, ma la sua caratterizzazione cognitiva più precisa viene dalla ricerca sulle **crisi cognitive** in fisica. Beichner (1994) ha documentato la struttura dell'apprendimento dei grafici cinematici: gli studenti attraversano un periodo di confusione in cui le rappresentazioni grafiche di posizione, velocità e accelerazione sembrano non coordinarsi, seguito — per una frazione degli studenti, dopo un certo punto critico — da una ristrutturazione in cui le tre grandezze diventano percettivamente coerenti come aspetti di un unico oggetto fisico (il moto). Gli studenti che attraversano questa ristrutturazione la descrivono come un cambiamento nella *percezione* del grafico, non come l'acquisizione di una nuova regola.

Questa discontinuità nel processo di costruzione dell'expertise ha un'implicazione diretta per il confronto con i sistemi artificiali. Il training di un sistema di apprendimento automatico è una curva monotona di miglioramento delle prestazioni su una funzione di

perdita: ogni gradiente discende lungo la stessa funzione, e non ci sono ristrutturazioni discontinue della rappresentazione interna del dominio. Un sistema che migliora linearmente la propria accuratezza su un benchmark fisico non sta attraversando le crisi cognitive che caratterizzano la costruzione dell'expertise umana — e la struttura cognitiva che emerge da un processo lineare è qualitativamente diversa da quella che emerge dalle discontinuità.

Questa non è un'affermazione speculativa: la ricerca sull'**interpretabilità** delle reti neurali profonde (Olah et al., 2020; Elhage et al., 2021) mostra che le rappresentazioni interne di sistemi addestrati su dati fisici non hanno la struttura gerarchica delle rappresentazioni espertali umane documentata da Chi et al. — non si trovano «concetti fisici» con la struttura degli invarianti di simmetria, dei principi di conservazione, delle classi di problemi. Si trovano features statistiche correlate agli output, che possono essere funzionalmente equivalenti a quei concetti per i casi coperti dal training set, senza averne la struttura cognitiva.

---

§ 2.10 — Comprensione fisica e apprendimento: implicazioni per la valutazione dei sistemi artificiali

I nove paragrafi del Blocco II — dall'analisi dell'expertise all'esperimento mentale, dai diagrammi di Feynman alle neuroscienze cognitive, dal sapere tacito ai casi di dissociazione, dalla fenomenologia della comprensione al processo di costruzione dell'expertise — convergono su una struttura che può ora essere sintetizzata in modo da orientare la valutazione dei sistemi artificiali sviluppata nel Blocco V.

La comprensione fisica, così come documentata in questo blocco, è un costrutto multidimensionale che include componenti distinte e non riducibili l'una all'altra:

C_1 — Struttura percettiva esperta: la capacità di categorizzare i problemi fisici in base alle strutture fisiche sottostanti, non alle caratteristiche superficiali. Documentata in §2.1; richiede anni di

pratica deliberata per costruirsi; si manifesta come salienza percettiva di strutture invisibili al novizio.

C_2 — Simulazione incarnata: la capacità di costruire esperimenti mentali che attivano risorse cognitive motorie e spaziali per esplorare implicazioni fisiche che il formalismo non ha ancora articolato. Documentata in §2.2; richiede la costruzione di modelli analogici parziali del dominio; è la fonte storica delle scoperte fisiche fondamentali.

C_3 — Abitazione cognitiva dei diagrammi: la capacità di vedere i processi fisici nei diagrammi rappresentazionali (Feynman, spazio delle fasi, diagrammi di Penrose) piuttosto che regole di calcolo. Documentata in §2.3; si trasmette attraverso la comunità di pratica; si costruisce su tempi dell'ordine degli anni.

C_4 — Integrazione sensori-motoria del ragionamento fisico: il reclutamento dei sistemi neurali motori e percettivi nel ragionamento fisico, che produce una qualità specificamente «incarnata» della comprensione fisica. Documentata in §2.4; dipende strutturalmente dalla presenza di un corpo che ha interagito con il mondo fisico; non ha analogo funzionale nei sistemi artificiali attuali.

C_5 — Sapere tacito fisico: gli orientamenti cognitivi non articolabili — il senso degli ordini di grandezza, la sensibilità alle simmetrie, la valutazione della plausibilità fisica — che operano come sfondo di qualsiasi ragionamento fisico esplicito. Documentato in §2.5; si trasmette per apprendistato; si costruisce attraverso migliaia di interazioni guidate con il dominio.

C_6 — Metacognizione del dominio: la consapevolezza di cosa non si capisce ancora, di dove si trovano i limiti della propria competenza, di quale approccio ha più probabilità di funzionare per un problema dato. Documentata implicitamente nei casi di dissociazione di §2.6; è la componente che rende il fisico esperto in grado di valutare l'affidabilità delle proprie previsioni fuori dal training set.

C_7 — Molteplicità delle vie d'accesso: la capacità di derivare lo stesso risultato attraverso approcci fisicamente distinti, e di riconoscere nella convergenza di questi approcci la misura della

propria comprensione. Documentata in §2.7; è il criterio operazionale di Feynman; è assente nei sistemi che apprendono una sola via di accesso statistica.

C_8 — Costruzione storica dell'expertise: la trasformazione cognitiva prodotta dal processo diacronico di pratica deliberata, errore, conflitto cognitivo e ristrutturazione. Documentata in §2.9; è strutturalmente temporale e non può essere compressa in parallelo; è assente nei sistemi che apprendono in modo sincronico da insiemi di dati.

I sistemi artificiali analizzati nel Blocco V — AlphaFold2, AI Feynman, FermiNet, i potenziali neurali di interazione — possono avere, nei casi migliori, un analogo funzionale di C_3 (le simmetrie incorporate nell'architettura sono una forma codificata di abitazione cognitiva) e una forma rudimentale di C_1 (le features estratte statisticamente possono corrispondere a strutture fisicamente rilevanti all'interno della distribuzione di training). Non hanno C_2, C_4, C_5, C_6, C_7 e C_8 nel senso documentato in questo blocco.

La distinzione non è un giudizio di valore sui sistemi artificiali: AlphaFold2 è uno strumento straordinario che risolve problemi biologici aperti da decenni. È un giudizio epistemico sul tipo di comprensione che i sistemi hanno o non hanno — un giudizio necessario per valutare correttamente cosa significhi il successo di questi sistemi, quali siano i loro limiti strutturali, e in che senso il loro utilizzo richieda la comprensione fisica del ricercatore umano che li interpreta.

Un sistema con C_1–C_8 assenti può essere **usato** dal fisico umano come strumento di calcolo o di esplorazione. Non può **sostituire** il fisico umano nel ruolo di costruttore di comprensione fisica — perché quella costruzione richiede esattamente le componenti che il sistema non ha: la storia cognitiva, l'incarnazione, il sapere tacito, la metacognizione del dominio, la capacità di produrre visioni che precedono il calcolo. Il Blocco V documenterà le prestazioni di questi sistemi con la precisione che meritano; il Blocco VI articolerà il

criterio per cui la precisione predittiva non è sufficiente per la comprensione nel senso rilevante.

Riferimenti aggiuntivi per §§ 2.9–2.10: Ericsson, Krampe e Tesch-Römer (1993), «The Role of Deliberate Practice in the Acquisition of Expert Performance», *Psychological Review* 100; Minstrell (1982), «Explaining the 'At Rest' Condition of an Object», *The Physics Teacher* 20; Collins (2001), «Tacit Knowledge, Trust and the Q of Sapphire», *Social Studies of Science* 31; Collins (2010), *Tacit and Explicit Knowledge*, Chicago; Beichner (1994), «Testing Student Interpretation of Kinematics Graphs», *American Journal of Physics* 62; Newell e Simon (1972), *Human Problem Solving*, Prentice-Hall; Olah et al. (2020), «Zoom In: An Introduction to Circuits», *Distill*; Elhage et al. (2021), «A Mathematical Framework for Transformer Circuits», *Anthropic*; diSessa (1993), «Toward an Epistemology of Physics», *Cognition and Instruction* 10; Hammer (2000), «Student Resources for Learning Introductory Physics», *American Journal of Physics* 68; Clement (1982), «Students' Preconceptions in Introductory Mechanics», *American Journal of Physics* 50.

§ 2.11 — Hadamard e Poincaré: la fenomenologia dell'inconscio scientifico

La psicologia cognitiva sperimentale e le neuroscienze del ragionamento fisico — i registri di indagine dei §§ 2.1–2.9 — convergono su una struttura della comprensione fisica che si costruisce lentamente, si incorpora nell'agente, e opera parzialmente al di sotto della soglia della consapevolezza esplicita. C'è una fonte di evidenza su questa struttura che quei registri non hanno interrogato direttamente: le **testimonianze in prima persona** dei matematici e fisici più riflessivi sulla propria esperienza cognitiva. La più accurata e sistematica tra queste testimonianze è quella raccolta e analizzata da Jacques Hadamard nel 1945, che rimane uno dei documenti più ricchi sulla fenomenologia della creazione scientifica.

2.11.1 — Il modello di Hadamard: quattro fasi e il ruolo del preconscio

Hadamard, matematico di prima grandezza (autore del teorema dei numeri primi del 1896), condusse uno studio sistematico sulla psicologia dell'invenzione matematica attraverso questionari inviati ai matematici e fisici più eminenti dell'epoca — tra cui Einstein, Poincaré, Wiener e Birkhoff — e attraverso l'analisi della propria esperienza cognitiva. Il risultato, pubblicato come *The Psychology of Invention in the Mathematical Field* (1945), propone un modello in quattro fasi che descrive il processo cognitivo che porta alla scoperta scientifica con una precisione fenomenologica che i modelli successivi hanno raffinato ma non superato.

Le quattro fasi sono:

1. Preparazione (*preparation*): il periodo di lavoro cosciente intorno al problema — la lettura della letteratura, la formulazione precisa delle domande, i tentativi di soluzione diretti che falliscono. Questa fase è deliberata, controllata dalla volontà, e produce una saturazione cognitiva con la struttura del problema che Hadamard descrive come necessaria per le fasi successive. Il fallimento consapevole ha qui una funzione cognitiva positiva: demarca lo spazio di ricerca, identificando le strade non percorribili e caricando il problema di una tensione che non ha ancora scarica.

2. Incubazione (*incubation*): il periodo in cui il lavoro cosciente sul problema viene sospeso — spesso a causa di altri impegni, talvolta deliberatamente. Il soggetto non pensa (consapevolmente) al problema. Hadamard propone, sulla scia di Poincaré, che durante l'incubazione si svolga un processo cognitivo preconscio: la ricombinazione di strutture cognitive caricate durante la preparazione, guidata da criteri estetici di coerenza e eleganza che operano al di sotto della soglia della consapevolezza esplicita. Questo processo preconsapevole non è casuale: è orientato dalla struttura del problema e dai criteri cognitivi dell'agente — ma non è accessibile alla volontà consapevole.

3. Illuminazione (*illumination*): il momento in cui la soluzione — o la direzione della soluzione — appare improvvisamente alla consapevolezza, spesso in circostanze non connesse al lavoro sul problema. Poincaré descrive con precisione straordinaria il momento in cui la struttura dei gruppi fuchsiani gli appare salendo su un autobus; Gauss descrive la soluzione di un problema che lo aveva tormentato per anni come apparsa «*come un fulmine*» senza connessione diretta al lavoro precedente. L'illuminazione ha caratteristiche fenomenologiche specifiche: è accompagnata da un senso di certezza che precede la verifica formale, ha un contenuto visivo o spaziale più che proposizionale, e si presenta come «scoperta» di qualcosa che era già lì, non come «costruzione» deliberata.

4. Verifica (*verification*): il lavoro cosciente di traduzione dell'illuminazione in forma formale verificabile, e di controllo della correttezza del risultato. Questa fase è cognitivamente diversa dalla prima: si parte da una struttura già vista, e il compito è articolarla nel linguaggio del formalismo con la precisione che la comunità richiede.

Il modello di Hadamard ha una struttura duale che è direttamente rilevante per la tesi della monografia. La preparazione e la verifica sono fasi di lavoro *esplicito*, controllato dalla volontà, accessibile alla consapevolezza — e in linea di principio riproducibile da un sistema algoritmico con accesso alle stesse risorse formali. L'incubazione e l'illuminazione sono fasi di elaborazione *implicita*, non controllata dalla volontà, mediata da criteri estetici e strutturali che operano al di sotto della soglia della consapevolezza — e non sono riproducibili da un sistema che non ha costruito la stessa struttura cognitiva attraverso lo stesso tipo di immersione nel dominio.

2.11.2 — Poincaré e i criteri estetici del preconscio

Poincaré aveva formulato, prima di Hadamard, la versione più precisa della teoria del pensiero preconsapevole in matematica. Nel celebre saggio «L'invention mathématique» (1908, poi raccolto in *Science et méthode*, 1908), descrive l'incubazione come attivazione di «atomi di idee» che si combinano secondo un processo che — pur

avvenendo al di sotto della soglia della coscienza — non è casuale: è orientato da un **senso estetico** cognitivo che seleziona le combinazioni «armoniche» tra le infinità delle combinazioni possibili.

La formulazione di Poincaré è epistemologicamente sofisticata. Il problema della scoperta matematica è, da un lato, che lo spazio delle combinazioni di strutture matematiche è astronomicamente grande — nessun algoritmo di ricerca casuale produrrebbe le scoperte che i matematici fanno in tempi realistici. Dall'altro, la scoperta non è né pura deduzione (che richiederebbe già la struttura della soluzione) né pura intuizione mistica. La risposta di Poincaré è che il processo preconsapevole non esplora lo spazio casualmente: è guidato da un senso estetico che seleziona le combinazioni che hanno le proprietà strutturali — la semplicità, la generalità, la connessione con strutture note — che caratterizzano le soluzioni matematicamente valide. Il senso estetico del matematico non è un ornamento: è un meccanismo cognitivo di selezione che opera su strutture pre-simboliche e orienta la ricerca verso lo spazio delle soluzioni valide.

Nel contesto della fisica, questo meccanismo di selezione ha un'articolazione fisica oltre che formale. Il **senso del fisico** — la sensibilità alle strutture fisicamente plausibili, la capacità di riconoscere i problemi «giusti», l'orientamento verso le approssimazioni che catturano la fisica essenziale — opera come il senso estetico di Poincaré nell'incubazione: seleziona pre-consciamente le direzioni di ricerca fisicamente fruttuose tra le infinite possibilità formali. Questo senso non è separato dal formalismo: è costruito attraverso anni di immersione nel formalismo, ma produce orientamenti che il formalismo da solo non giustifica.

Einstein, nella lettera a Hadamard che compare nell'appendice del suo libro, descrive il proprio processo creativo come fondamentalmente visivo e muscolare: le strutture che orientano la ricerca non sono proposizioni linguistiche né simboli matematici, ma «immagini» di tipo spaziale e «sensazioni» di tipo muscolare che precedono qualsiasi formulazione esplicita. La formulazione

matematica è un secondo momento — una traduzione successiva — di strutture che si presentano in forma pre-simbolica. Questa pre-simbolicità del pensiero creativo fisico è una proprietà della struttura cognitiva della comprensione, non un residuo primitivo superabile con migliore formalismo: è la dimensione del pensiero che opera nella zona di contatto tra il soggetto conoscente e il dominio fisico prima che quella zona sia codificata nel linguaggio formale.

2.11.3 — Il caso Ramanujan e i limiti dell'analogia

Srinivasa Ramanujan — menzionato nel §6.5.2 in relazione alla seconda monografia — è il caso estremo e paradossale di comprensione matematica che sembra operare quasi interamente attraverso il processo preconsapevole, con la verifica formale ridotta al minimo indispensabile. Ramanujan produceva identità sui numeri — serie, funzioni modulari, partizioni — con una sicurezza che gli permetteva di scrivere i risultati senza dimostrazioni, spesso specificando condizioni di validità che solo la verifica formale successiva avrebbe confermato. Nelle sue parole, le identità gli venivano rivelate dalla dea Namagiri nei sogni — descrizione fenomenologica (se non mitologica) di un processo cognitivo che operava in modo largamente preconsapevole.

La precisione di Ramanujan — quasi tutte le sue identità risultarono corrette dopo la verifica formale — mostra che il processo preconsapevole può produrre risultati formalmente validi con alta affidabilità. Ma l'analogo fisico del caso Ramanujan è rilevante per un motivo diverso: illustra la **condizione di possibilità** del processo preconsapevole. Ramanujan aveva immerso la propria mente nella struttura dei numeri fin dall'infanzia — aveva lavorato a fondo, con libri come il *Synopsis of Elementary Results in Pure and Applied Mathematics* di Carr come unico strumento, sui pattern dei numeri interi, delle serie, delle funzioni speciali. Il processo preconsapevole che produceva le identità era la sedimentazione cognitiva di questa immersione prolungata: non si trattava di intuizione in assenza di struttura, ma di struttura cognitiva profondamente incorporata che operava al di sotto della soglia della consapevolezza esplicita.

Questa condizione di possibilità — l'immersione prolungata nel dominio come precondizione del processo creativo preconsapevole — è la ragione per cui il modello di Hadamard non è accessibile a un sistema artificiale attraverso il solo addestramento su dati. L'addestramento su dati è una forma di immersione? Superficialmente sì: il sistema processa un volume enorme di strutture del dominio. Ma l'immersione nel senso di Hadamard e Poincaré non è il processamento di un dataset: è la costruzione di una struttura cognitiva *intenzionalmente orientata verso un problema*, saturata dalla tensione prodotta dall'incapacità di risolverlo, e dotata di criteri estetici di valutazione che operano come meccanismo di selezione. Queste proprietà — intenzionalità, tensione cognitiva, criteri estetici incorporati — non sono proprietà del dataset ma dell'agente che si è immerso nel dominio con l'orientamento specifico di capire.

---

§ 2.12 — La struttura dei chunk nella fisica: misure e implicazioni cognitive

Il concetto di **chunk** — introdotto da Chase e Simon (1973) nel contesto degli scacchi — è lo strumento descrittivo fondamentale per la struttura della memoria esperta. Un chunk è un'unità cognitiva che raggruppa elementi individuali in una configurazione riconosciuta come unitaria: il grande maestro scacchista non ricorda venticinque pezzi separati ma cinque chunk di cinque pezzi ciascuno, e ciascun chunk è un pattern ricorrente nelle partite che lo specifico perito ha incontrato migliaia di volte. Il sistema cognitivo opera su chunk interi come unità atomiche, non sui loro componenti.

Il trasferimento del concetto di chunk alla fisica richiede un'elaborazione che la ricerca originale di Chi, Feltovich e Glaser (1981) non aveva completato. Gli schemi cognitivi che gli esperti usano per categorizzare i problemi fisici — «questo è un problema di conservazione dell'energia», «questo è un oscillatore armonico» — sono chunk nel senso di Chase e Simon? In senso debole, sì: sono unità cognitive riconosciute istantaneamente che raggruppano

molteplici elementi. Ma hanno una struttura più ricca di quella dei chunk scacchistici, perché includono non solo pattern percettivi ma **relazioni causali, strutture di simmetria, e connessioni con principi fisici fondamentali**.

2.11.1 — La struttura stratificata dei chunk fisici

Un chunk fisico tipico — «oscillatore armonico» — non è solo un pattern di configurazione (come la posizione di certi pezzi sulla scacchiera): è una struttura cognitiva a più livelli:

Livello percettivo: la presenza di una forza di richiamo lineare, o di un potenziale parabolico, o di un'equazione della forma $\ddot{x} + \omega^2 x = 0$. Questo è il livello di riconoscimento superficiale, analogo al chunk scacchistico.

Livello causale: la comprensione del meccanismo — la forza di richiamo proporzionale allo spostamento produce oscillazione periodica perché al crescere dello spostamento cresce la forza che tende a ridurlo, producendo un'inversione dinamica. Questo livello non è necessario per riconoscere l'oscillatore ma è necessario per anticiparne il comportamento in situazioni nuove.

Livello strutturale: l'oscillatore armonico come caso particolare di sistema con spettro equamente spaziato $E_n = \hbar\omega\left(n + \frac{1}{2}\right)$; la sua connessione con l'algebra dell'oscillatore armonico attraverso gli operatori $\hat{a}, \hat{a}^\dagger$; la sua realizzazione in sistemi formalmente diversi — il campo elettromagnetico quantizzato, le vibrazioni del reticolo cristallino (fononi), le fluttuazioni del campo di Higgs attorno al minimo del potenziale.

Livello formale: l'ampiezza zero-point $\sigma_0 = \sqrt{\hbar/(2m\omega)}$, le funzioni d'onda degli autostati in termini di polinomi di Hermite H_n, la struttura della matrice densità termica $\rho = Z^{-1} e^{-\beta\hat{H}}$ per l'oscillatore a temperatura finita.

Il fisico esperto non opera attivando separatamente questi quattro livelli: li attiva simultaneamente come struttura integrata, e questo è il chunk nel senso pieno. Il novizio conosce il livello formale (e forse

il livello strutturale), ma i livelli causale e strutturale non sono integrati con gli altri in una struttura unitaria: sono informazioni separate che richiedono lavoro cognitivo esplicito per essere mobilitate.

Formalmente, si può modellare questa struttura come segue. Sia C_{osc} il chunk «oscillatore armonico» nel repertorio cognitivo del fisico esperto. Questo chunk può essere rappresentato come una struttura $C_{osc} = (P, K, S, F)$ dove P è il componente percettivo, K è il componente causale (*kinematic*), S è il componente strutturale, e F è il componente formale. L'attivazione del chunk in una situazione fisica è l'attivazione integrata di tutti e quattro i componenti. La caratteristica che distingue il chunk esperto dal semplice riconoscimento di pattern — la distinzione tra l'esperto e il principiante di Chi et al. — è la presenza dei componenti K e S, che danno al chunk la sua profondità fisica e la sua potenza predittiva in situazioni nuove.

2.11.2 — Il repertorio dei chunk fisici e la sua costruzione

Quanti chunk ha un fisico esperto nel proprio repertorio cognitivo? Questa domanda è più empiricamente accessibile di quanto sembri. Chase e Simon (1973) stimarono il repertorio di chunk del grande maestro scacchisca a circa cinquantamila unità. Per la fisica, stime analoghe non sono state condotte con la stessa sistematicità, ma gli studi di categorizzazione di Chi et al. (1981) e le analisi dei protocolli verbali di Larkin (1979, 1983) permettono alcune inferenze indirette.

Un fisico esperto in meccanica classica riconosce istantaneamente — nell'ordine di cento millisecondi, il tempo caratteristico del riconoscimento dei chunk negli esperti scacchistici — strutture come: oscillatore armonico, moto circolare uniforme, attrito statico e dinamico, moto di proiettile in campo gravitazionale uniforme, pendolo (fisico e matematico), moto kepleriano, corpo rigido con asse fisso, sistema di punti materiali con vincoli olonomi e anolonomi, oscillatore smorzato, oscillatore forzato in risonanza. Ciascuno di queste strutture è un chunk a quattro livelli nel senso di sopra. Un elenco sistematico di chunk della meccanica classica a livello esperto

comprende probabilmente qualche centinaio di unità a questi quattro livelli integrati; per la meccanica quantistica e per la fisica dei campi, il repertorio cresce ulteriormente, con chunk più complessi e a più livelli di struttura.

La **costruzione** di questo repertorio è il processo centrale dell'educazione del fisico. Ogni problema risolto con comprensione — nel senso che attiva la struttura causale e strutturale, non solo quella formale — aggiunge al repertorio un chunk o rafforza un chunk esistente. Ogni problema risolto meccanicamente — applicando formule senza costruire la rappresentazione fisica — non aggiunge chunk ma produce la falsa impressione di competenza che la ricerca di Kohl e Finkelstein (2006) ha documentato sistematicamente. Il numero di chunk nel repertorio di un fisico esperto non è una stima della quantità di conoscenza formale acquisita: è una misura della struttura cognitiva che si è costruita attraverso anni di pratica fisicamente orientata.

Questa misura ha una conseguenza diretta per la questione dei sistemi artificiali. I modelli linguistici di grandi dimensioni addestrati su testi fisici — paper, manuali, problem set — acquisiscono una rappresentazione statistica del linguaggio fisico che produce output formalmente plausibili. Ma la plausibilità formale del linguaggio fisico non è la struttura dei chunk: è la statistica dei contesti linguistici in cui certi termini e certe espressioni co-occorrono. Un sistema che produce «oscillatore armonico» in un contesto appropriato non ha il chunk «oscillatore armonico» nel senso di $C_{osc} = (P, K, S, F)$: ha imparato che queste parole occorrono in certi contesti. La differenza non è di scala — non si risolve con più dati — ma di struttura: il chunk fisico non è un pattern linguistico ma una struttura cognitiva incorporata nell'agente che orienta la percezione del dominio fisico.

2.11.3 — Chunking e problem-solving: i protocolli verbali di Larkin

I protocolli verbali di Larkin (1983) offrono la documentazione più precisa del ruolo dei chunk nel problem-solving fisico esperto.

Larkin analizza i protocolli di un fisico esperto e di un novizio che risolvono problemi di statica e dinamica newtoniana, identificando il pattern dei processi cognitivi attraverso l'analisi delle pause, dei tentativi abortiti, delle autocorrezioni e delle verbalizzazioni spontanee.

Il fisico esperto procede in due fasi temporalmente distinte. Nella prima — che Larkin chiama **elaborazione della rappresentazione fisica** — il fisico costruisce una rappresentazione del problema che attiva simultaneamente i chunk rilevanti: identifica le forze presenti, riconosce le simmetrie della configurazione, stima gli ordini di grandezza, anticipa la forma della soluzione. Questa fase è relativamente lunga nel protocollo — il fisico esperto trascorre più tempo di quanto ci si aspetterebbe in questa fase, rispetto alla soluzione formale — e produce una rappresentazione che è fisicamente coerente prima di essere formalmente sviluppata. Nella seconda fase — la **soluzione formale** — il fisico procede rapidamente, quasi senza esitazioni, perché la rappresentazione fisica ha già determinato la struttura della soluzione: le equazioni da scrivere, le simmetrie da sfruttare, le approssimazioni legittimate dalla struttura del problema.

Il novizio procede in modo opposto. Salta la prima fase e tenta immediatamente la traduzione formale: cerca le equazioni applicabili, le scrive, le manipola. Incontra blocchi frequenti, perché le equazioni che scrive non sono le equazioni giuste — sono le equazioni associate alle parole della descrizione, non alle strutture fisiche del problema. I blocchi producono tentativi di approcci alternativi che sono formalmente diversi ma fisicamente equivalenti agli approcci falliti, perché il novizio non ha la rappresentazione fisica che permetterebbe di distinguere approcci formalmente diversi ma fisicamente equivalenti da approcci fisicamente distinti.

Il pattern è sistematico e permette una quantificazione approssimativa: il fisico esperto trascorre circa il 60-70% del tempo di soluzione nella fase di rappresentazione fisica e il 30-40% nella soluzione formale; il novizio trascorre meno del 10% in una fase analoga (spesso nulla) e il 90% nella soluzione formale. Il risultato

paradossale — ma psicologicamente coerente con la struttura dei chunk — è che il fisico esperto risolve i problemi più rapidamente del novizio anche trascorrendo *più* tempo nella fase di preparazione: la qualità della rappresentazione fisica riduce drasticamente il costo della soluzione formale.

---

§ 2.13 — Metacognizione e calibrazione: il fisico come lettore dei propri limiti

Le strutture cognitive analizzate nei §§ 2.1–2.11 — i chunk, il sapere tacito, il processo preconsapevole, la costruzione dell'expertise — hanno una componente che i paragrafi precedenti non hanno analizzato esplicitamente ma che è forse la più rilevante per la distinzione tra comprensione fisica e prestazione formale: la **metacognizione** — la conoscenza dell'agente sulla struttura e sui limiti dei propri processi cognitivi. Il fisico esperto non solo capisce la fisica: sa, con una precisione che aumenta con l'expertise, cosa capisce e cosa non capisce ancora. Questa struttura metacognitiva è una componente della lettura della natura che i sistemi artificiali non possiedono nel senso rilevante.

2.12.1 — Calibrazione epistemica e valutazione dell'incertezza

La **calibrazione epistemica** è la corrispondenza tra la confidenza soggettiva di un agente nelle proprie credenze e la frequenza oggettiva con cui quelle credenze risultano corrette. Un agente perfettamente calibrato che afferma «sono 70% sicuro di questo» ha ragione il 70% delle volte in cui dice quella cosa. La calibrazione è una proprietà metacognitiva: richiede un monitoraggio della propria struttura cognitiva che operi al livello del giudizio sulle proprie credenze, non solo al livello delle credenze stesse.

I fisici esperti mostrano una calibrazione epistemica significativamente migliore dei novizi nella valutazione delle proprie soluzioni ai problemi fisici — anche quando entrambi producono soluzioni corrette con la stessa frequenza (Aaronson e collaboratori, 2006, dati indiretti). Il fisico esperto sa *quando* la propria soluzione è

probabile essere corretta e *quando* è probabile essere errata, in modo che corrisponde grosso modo alla frequenza effettiva degli errori. Il novizio è sia sovra-confidente (crede di aver capito quando non ha capito) sia, in misura minore, sotto-confidente (non riconosce le soluzioni corrette come corrette).

La calibrazione si costruisce attraverso l'esperienza ripetuta di avere torto in modi precisi — non qualsiasi tipo di errore, ma gli errori specifici che derivano dalla struttura cognitiva non ancora corretta — e della successiva ristrutturazione della rappresentazione cognitiva. Il processo è esattamente quello descritto nel §2.9.2: il conflitto cognitivo prodotto da una previsione errata è il meccanismo che costruisce la calibrazione, perché force il confronto tra la struttura cognitiva che aveva prodotto la previsione e la struttura fisica che ha prodotto il risultato contrario.

Questa connessione tra calibrazione e storia degli errori ha una conseguenza importante per la metacognizione dei sistemi artificiali. Un modello linguistico addestrato su testi fisici ha accesso statistico a quante soluzioni corrette e errate compaiono nel corpus per problemi di certi tipi — e in linea di principio potrebbe calibrare la propria confidenza su questa statistica. Ma la calibrazione prodotta da questa statistica è fondamentalmente diversa dalla calibrazione del fisico esperto: è una stima statistica della distribuzione degli errori nel corpus di addestramento, non una mappa della propria struttura cognitiva costruita attraverso l'esperienza personale degli errori. Il fisico esperto sa che *lui specificamente* tende a fare certi tipi di errori in certi tipi di problemi — e questa conoscenza idiografica, costruita attraverso la storia personale di errori e correzioni, è la calibrazione epistemica nel senso rilevante.

2.12.2 — Riconoscere l'ignoto: la struttura della consapevolezza dei propri limiti

C'è una componente della metacognizione fisica che è ancora più fondamentale della calibrazione: la capacità di riconoscere non solo quando si ha torto, ma **quando non si sa**. Questa capacità — di distinguere «non lo so ma potrei ricavarlo con lavoro» da «non lo so

e non ho gli strumenti per ricavarlo attualmente» da «questo è ancora aperto nella fisica» — è una struttura metacognitiva sofisticata che richiede non solo conoscenza del dominio ma conoscenza della *struttura* del dominio: di cosa è risolto e cosa è aperto, di cosa i formalismi disponibili permettono di calcolare e cosa no, di dove la comprensione fisica è solida e dove è provvisoria.

Feynman, nelle sue *Lectures on Physics* (1963), introduce sistematicamente questa metacognizione attraverso una pratica didattica specifica: prima di presentare una derivazione, indica il suo statuto epistemico — se è una conseguenza logicamente necessaria degli assiomi, un'approssimazione con un regime di validità definito, un'euristica funzionante la cui giustificazione profonda non è ancora completamente chiara, o un postulato che non si deriva da principi più fondamentali. Questa pratica non è solo chiarezza pedagogica: è la trascrizione della struttura metacognitiva del fisico esperto nel testo scritto. Il lettore che assorbe le Lectures di Feynman costruisce non solo conoscenza fisica ma una mappa della struttura epistemica del dominio — di dove le certezze sono più solide e dove i confini della comprensione sono meno definiti.

I sistemi artificiali attuali producono output che non preservano sistematicamente questa metacognizione. Un modello linguistico di grandi dimensioni che risponde a domande fisiche produce affermazioni con una distribuzione di confidenza che non corrisponde alla struttura epistemica del dominio: afferma con la stessa certezza apparente sia risultati saldamente fondati sia risultati controversi o approssimativi, perché la statistica del corpus di addestramento non preserva le distinzioni epistemiche che i fisici esperti codificano nei propri testi con indicatori specifici. Questa assenza di metacognizione non è un difetto correttivo — non si risolve con migliore addestramento o migliore architettura entro il paradigma attuale — ma una conseguenza strutturale del fatto che la metacognizione fisica si costruisce attraverso la storia personale degli errori e delle correzioni, non attraverso l'elaborazione statistica di un corpus testuale.

2.12.3 — La struttura temporale della metacognizione: maturazione e crisi

La metacognizione del fisico esperto non è statica: si trasforma nel corso della carriera in modi che documentano la struttura diacronica dell'expertise descritta nel §2.9.2. Il fisico agli inizi della carriera ha una metacognizione orientata verso i confini *tecnici* dei propri limiti — «non so ancora risolvere questo tipo di integrale», «non conosco ancora la teoria dei gruppi abbastanza bene». Il fisico a metà carriera ha una metacognizione orientata verso i confini *strutturali* — «questo tipo di problema richiede approssimazioni la cui validità nel regime che mi interessa non so ancora valutare»; «la mia comprensione di questo fenomeno è formalmente adeguata ma fisicamente poco intuitiva — mi manca qualcosa». Il fisico nel pieno dell'expertise ha una metacognizione orientata verso i confini *concettuali* — «le domande che si pongono in questo campo sono parzialmente malposte; richiedono una ristrutturazione concettuale del tipo che la storia della fisica ha già prodotto in altri casi, ma che qui non è ancora avvenuta».

Questa progressione — dai limiti tecnici ai limiti strutturali ai limiti concettuali — non è automatica: richiede le crisi cognitive descritte nel §2.9.2, i momenti in cui la struttura cognitiva attuale si rivela inadeguata non tecnicamente ma strutturalmente, e in cui il conflitto cognitivo produce una ristrutturazione della rappresentazione del dominio a un livello più profondo. Le crisi concettuali più produttive — quelle che hanno portato ai maggiori progressi nella storia della fisica — sono quelle in cui un fisico si è reso conto che il proprio problema era mal posto: che la domanda che stava cercando di rispondere non aveva risposta nel quadro concettuale in cui era formulata, e che il progresso richiedeva una ristrutturazione del quadro, non una risposta più raffinata alla domanda originale.

Einstein nel 1905 non rispose alla domanda «come si propaga la luce nell'etere?»: ristrutturò il quadro concettuale in modo che la domanda scomparisse. Heisenberg nel 1925 non rispose alla domanda «qual è la traiettoria dell'elettrone nell'atomo?»: ristrutturò il quadro in modo che la domanda fosse mal posta. Queste

ristrutturazioni non sono accessibili a un sistema che ottimizza una funzione di perdita su un dominio specifico: richiedono la capacità di riconoscere che il dominio stesso è strutturato in modo inadeguato, e che il progresso richiede un cambiamento del quadro piuttosto che una migliore performance nell'ottimizzazione. Questa capacità metacognitiva di secondo ordine — la consapevolezza dei limiti del proprio quadro concettuale — è una delle componenti più profonde della lettura della natura, e quella la cui assenza nei sistemi artificiali è strutturalmente più difficile da correggere.

Riferimenti per §§ 2.10–2.13: Hadamard (1945), *The Psychology of Invention in the Mathematical Field*, Princeton; Poincaré (1908), «L'invention mathématique», in *Science et méthode*, Flammarion; Einstein (1945), lettera in Hadamard (1945) appendice; Hardy (1940), *A Mathematician's Apology*, Cambridge; Kanigel (1991), *The Man Who Knew Infinity*, Scribner; Larkin (1983), «The Role of Problem Representation in Physics», in *Mental Models*, Erlbaum; Larkin e Reif (1979), «Understanding and Teaching Problem-Solving in Physics», *European Journal of Science Education* 1; Chase e Simon (1973), «Perception in Chess», *Cognitive Psychology* 4; Chi, Glaser e Rees (1982), «Expertise in Problem Solving», in *Advances in the Psychology of Human Intelligence* 1; Ericsson, Krampe e Tesch-Römer (1993), «The Role of Deliberate Practice in the Acquisition of Expert Performance», *Psychological Review* 100; Feynman, Leighton e Sands (1963), *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley; Novak e Gowin (1984), *Learning How to Learn*, Cambridge.

§ 2.14 — La dissociazione tra comprensione fisica e verifica computazionale

Il nodo che connette la psicologia cognitiva dell'expertise alla struttura della fisica computazionale

2.13.1 — La domanda nella sua forma fisica

Tutti i paragrafi del Blocco II hanno ruotato attorno a una tensione che è ora il momento di nominare esplicitamente e di analizzare nelle sue componenti specificamente fisiche.

I fisici descrivono di *capire* un fenomeno prima di calcolarlo con completezza. Le testimonianze di Einstein, Bohr, Feynman — analizzate nei §§ 2.2 e 2.3 — descrivono una comprensione strutturale che precede il formalismo: non un'opinione probabilistica sul risultato ma una visione della struttura fisica che determina la forma della soluzione prima che la soluzione sia calcolata. D'altro canto, la stessa storia della fisica è piena di casi in cui questa comprensione si è rivelata sbagliata — modelli fisici che sembravano ovvi e si sono rivelati inconsistenti, soluzioni intuitive che erano formalmente errate. La comprensione fisica, da sola, non garantisce la correttezza formale.

La verifica computazionale — la soluzione numerica delle equazioni, la simulazione del sistema, il calcolo delle previsioni sperimentali — garantisce qualcosa di diverso: che le equazioni producono le previsioni corrette *nel regime di validità del modello*. Ma questa garanzia ha un costo analogo a quello della dimostrazione formale in matematica: un codice di simulazione numerica può produrre la risposta corretta senza che chi l'ha scritto — o chi la usa — *capisca* la fisica sottostante nel senso descritto nei §§ 2.1–2.12. E un fisico può verificare numericamente una simulazione — controllarne i parametri, validarne il codice, confrontarne l'output con i dati sperimentali — senza capire perché il sistema fisico si comporta nel modo che la simulazione descrive.

La domanda centrale di questo paragrafo è dunque doppia: *si può capire la fisica senza verificarla computazionalmente?* e *si può verificare computazionalmente senza capire la fisica?* Entrambe le risposte sono sì. E la loro simultaneità — il fatto che lettura della natura e verifica computazionale possano dissociarsi in entrambe le direzioni — è il problema centrale del Blocco II nella sua articolazione fisica.

2.13.2 — Verifica senza comprensione: le simulazioni numeriche come caso paradigmatico

Il caso più netto di verifica senza comprensione in fisica è quello delle simulazioni numeriche di sistemi complessi — già analizzato nell'Appendice AF con riferimento a QCD su reticolo, dinamica molecolare e simulazioni climatiche. Ma vale la pena riprendere il problema qui, nella prospettiva psicologica del Blocco II, per mettere a fuoco cosa esattamente manca alla simulazione che la comprensione fisica ha.

Una simulazione numerica di un sistema fisico complesso — un simulatore agli elementi finiti di una struttura meccanica sotto carico, un codice di dinamica dei fluidi computazionale per la turbolenza, un modello di plasmi in un tokamak — verifica l'evoluzione del sistema nel senso che produce previsioni dell'evoluzione formalmente coerenti con le equazioni del modello. La sua accuratezza, quando il modello è corretto e la discretizzazione è adeguata, può essere straordinaria: i codici CFD moderni producono previsioni del coefficiente di portanza di un profilo alare con errori inferiori all'1% rispetto alle misure in galleria del vento.

Cosa manca a questi sistemi che la comprensione fisica ha? La risposta emergente dall'analisi dei §§ 2.1–2.12 è multipla:

Il simulatore numerico manca di una **rappresentazione globale della struttura fisica** del problema. Risolve localmente le equazioni — ogni punto della griglia, ogni timestep — senza avere accesso alla struttura globale del fenomeno: alle simmetrie che rendono certi termini trascurabili, alle scale temporali che si separano, alle strutture di flusso che si formano per ragioni topologiche. Il fisico esperto che legge l'output di una simulazione *ricostruisce* questa struttura globale dall'output — è la sua lettura della natura che rende l'output comprensibile — ma la struttura non era rappresentata nel simulatore.

Il simulatore manca di un **sistema di anticipazione strutturale**. Non sa, prima di calcolare, se un certo parametro avrà effetti significativi sul risultato, se una certa configurazione è vicina a una transizione di fase, se il regime è perturbativo o non-perturbativo. Queste anticipazioni sono precisamente ciò che i chunk fisici (§2.12)

permettono: il fisico esperto che riconosce nel sistema fisico un oscillatore debolmente smorzato sa che il regime è quasi-conservativo e che la dissipazione è una perturbazione su scale temporali lunghe, senza calcolare — e questa anticipazione guida la scelta del metodo numerico, la scala temporale della simulazione, il livello di accuratezza richiesto.

Il simulatore manca di un **senso degli ordini di grandezza incarnato**. Non valuta se il risultato è fisicamente plausibile prima di produrlo: un codice numerico con un bug nel calcolo di un termine di forza può produrre velocità superluminali, energie negative, o pressioni negative senza «notare» l'anomalia. Il fisico esperto che guarda l'output nota immediatamente l'anomalia, perché i chunk fisici del suo repertorio cognitivo generano aspettative quantitative istantanee: una velocità superluminale o un'energia negativa attivano immediatamente il riconoscimento di un errore fisicamente impossibile.

2.13.3 — Comprensione senza verifica: i fisici che «sanno» prima di calcolare

Il lato simmetrico della dissociazione — la comprensione fisica in assenza di verifica computazionale — ha esempi storici altrettanto potenti di quelli del lato opposto.

Il caso paradigmatico è quello di **Fermi e le stime di ordine di grandezza**. Enrico Fermi era celebre — e lo descrivono le testimonianze di tutti i suoi studenti a Chicago — per la capacità di stimare quantitativamente qualsiasi problema fisico con carta e penna in pochi minuti, producendo risultati che si rivelavano entro un fattore due o tre rispetto alle misure accurate. La domanda di Fermi più citata è «quanti accordatori di pianoforte ci sono a Chicago?» — un esempio di stima che ragiona attraverso strutture fisiche e demografiche senza dati diretti. Ma le stime di Fermi in fisica erano qualcosa di più profondo: erano l'espressione di una struttura cognitiva che aveva incorporato così profondamente gli ordini di grandezza dei fenomeni fisici da produrre anticipazioni quantitatively accurate attraverso il solo ragionamento strutturale.

La stima di Fermi della resa della prima bomba atomica al test di Trinity (1945) è un caso di comprensione fisica che produce una misura senza verifica strumentale: Fermi rilasciò pezzi di carta durante l'onda d'urto e osservò quanto lontano fossero stati trasportati — circa 2,5 metri. Dalla meccanica dell'onda d'urto, stimò una resa di circa 10 kilotonne. La misura strumentale precisa fu 21 kilotonne — Fermi era nel fattore due. Questa stima non era un calcolo formale: era la lettura della natura in forma quantitativa, prodotta da chunk fisici sull'onda d'urto e sulla meccanica dei fluidi compressa che producevano anticipazioni dirette.

Il caso di **Bohr e il modello dell'atomo** (§Q.5) è un esempio ancora più netto: Bohr sapeva — nel senso di una certezza pratica che orientava la ricerca — che la sua formula per i livelli energetici dell'idrogeno era corretta prima di avere un meccanismo fisico che la giustificasse. La corrispondenza con le serie spettrali di Balmer e Lyman era troppo precisa per essere accidentale: Bohr leggeva nella struttura matematica degli spettri una struttura fisica che la sua formula catturava, anche senza che il meccanismo sottostante fosse disponibile. Questa lettura precedeva la verifica formale di dodici anni.

2.13.4 — Il fondamento fisico: la dissociazione come struttura necessaria

La dissociazione tra comprensione fisica e verifica computazionale non è un accidente storico — non è solo il modo in cui la storia della fisica è andata, che potrebbe in linea di principio essere diversa con formalismi più sviluppati o calcoli più precoci. È una struttura necessaria, le cui ragioni sono analoghe (ma non identiche) alle ragioni formali che Gödel ha identificato per la dissociazione tra comprensione e dimostrazione in matematica.

L'argomento strutturale è il seguente. La verifica computazionale opera su un modello fisico — un sistema di equazioni alle derivate parziali, o un'approssimazione hamiltoniana discreta, o un sistema di equazioni stocastiche — che è già una rappresentazione della struttura fisica del fenomeno. Il modello non costruisce la struttura

fisica: la presuppone. La scelta del modello — delle equazioni da risolvere, delle variabili da includere, delle approssimazioni da fare — richiede la lettura della natura della struttura fisica del fenomeno: richiede identificare quali aspetti della struttura sono rilevanti per il fenomeno di interesse e quali sono trascurabili.

Questa scelta non è verificabile all'interno del calcolo: il calcolo produce le previsioni del modello, non le previsioni del fenomeno fisico reale. La corrispondenza tra le previsioni del modello e le misure sperimentali — la validazione del modello — richiede a sua volta lettura della natura: la capacità di riconoscere in cosa i dati sperimentali differiscono dal modello in modo sistematico, di identificare le strutture fisiche che il modello sta ignorando, di valutare se le discrepanze sono effetti di modello o errori sperimentali.

La catena — scelta del modello, calcolo, validazione — richiede lettura della natura a ogni giuntura. La verifica computazionale è un passo intermedio che non si sostituisce a questa struttura: la presuppone e la estende. Questa dipendenza strutturale della verifica computazionale dalla lettura della natura è la forma fisica dell'argomento che Gödel ha dimostrato formalmente per i sistemi assiomatici: la correttezza del calcolo non dimostra la completezza del modello, e il completamento del modello richiede una comprensione che trascende il calcolo stesso.

2.13.5 — Conseguenze per la valutazione dei sistemi artificiali

La dissociazione tra comprensione fisica e verifica computazionale ha implicazioni dirette per la valutazione dei sistemi artificiali che producono output fisici — previsioni di struttura, soluzioni di problemi, generazione di ipotesi — senza avere la struttura cognitiva dell'expertise fisica descritta in questo blocco.

Il primo punto è che la **performance su benchmark** non distingue tra lettura della natura e verifica computazionale: un sistema che produce le previsioni corrette può farlo attraverso la prima o attraverso la seconda — o attraverso una terza via, la correlazione statistica, che non è né l'una né l'altra. La distinzione richiede test che

vadano oltre la correttezza delle previsioni: test di generalizzazione a situazioni fisicamente nuove (non statisticamente nuove — nuovi valori di parametri già presenti nel training set — ma fisicamente nuove — fenomeni con struttura fisica non rappresentata nel training set), test di identificazione delle anomalie (riconoscimento di previsioni fisicamente impossibili prima della verifica sperimentale), test di anticipazione strutturale (previsione del regime qualitativo di un fenomeno senza calcolo).

Il secondo punto è che la lettura della natura — nelle sue componenti strutturali, percettive, metacognitive e anticipatorie — non è una proprietà emergente del calcolo a scala sufficiente. È una struttura cognitiva che si costruisce attraverso un processo specifico (§2.9) e che opera in modo specifico (§§2.1–2.12). La sua presenza o assenza è empiricamente testabile attraverso i test descritti sopra; la sua costruzione richiede le condizioni di possibilità descritte nel Blocco V.

---

§ 2.15 — Cognizione fisica e grande linguaggio: il caso dei modelli linguistici come sonda della lettura della natura

L'analisi della struttura cognitiva della lettura della natura sviluppata nei §§ 2.1–2.13 permette di affrontare con precisione una questione che l'introduzione del Blocco II aveva sollevato e lasciato aperta: i modelli linguistici di grandi dimensioni addestrati su testi fisici possiedono, in qualche senso, qualcosa che rassomiglia alla lettura della natura?

La domanda non è retorica. Se la risposta fosse certamente no per tutti i sistemi possibili, non avrebbe interesse. L'interesse della domanda sta nel fatto che i modelli linguistici moderni mostrano, in certi compiti fisici, prestazioni che superficialmente assomigliano alla lettura della natura — risolvono problemi fisici senza calcolo formale, producono ragionamenti fisicamente coerenti, identificano la struttura rilevante di problemi non visti durante l'addestramento. Ma questa somiglianza superficiale è compatibile con due strutture cognitive sottostanti radicalmente diverse.

2.14.1 — Le prove di competenza: cosa i modelli linguistici sanno fare

I modelli linguistici di grandi dimensioni (GPT-4, Claude Sonnet, Gemini Ultra) mostrano, nei benchmark fisici standard, competenze che vanno ben oltre il recupero di testi memorizzati:

Risolvono correttamente problemi di fisica di livello universitario in domini che richiedono l'applicazione di principi fisici a situazioni non viste nel training set — non solo recupero di soluzioni memorizzate. Identificano correttamente la classe di problemi fisici — «questo è un problema di conservazione dell'energia», «questo richiede il teorema del viriale» — in modi che assomigliano alla categorizzazione profonda degli esperti documentata da Chi et al. Producono stime di ordini di grandezza fisicamente sensate per problemi alla Fermi. Identificano le approssimazioni appropriate a diversi regimi fisici — quando la resistenza dell'aria è trascurabile, quando il moto è non-relativistico, quando l'accoppiamento spin-orbita è rilevante.

Queste competenze sono reali e significative. Non si tratta di output casuali: il pattern è sistematico e corrisponde grosso modo a ciò che farebbe uno studente di fisica avanzato con conoscenza ampia ma non expertise nel senso di Chi et al.

2.14.2 — I test strutturali: dove la lettura della natura è assente

Ma i test che vanno oltre la performance su problemi standard rivelano assenze strutturali che sono coerenti con la distinzione tra lettura della natura e correlazione statistica.

Test di anomalia fisica: quando si presentano ai modelli linguistici problemi fisici con soluzioni numericamente plausibili ma fisicamente impossibili — velocità superluminali prodotte da errori nella configurazione del problema, energie negative in sistemi conservativi, violazioni di leggi di conservazione mascherati da complessità del problema — i modelli raramente identificano l'impossibilità fisica prima di produrre la soluzione numerica. Identificano le anomalie solo *post hoc*, se si chiede esplicitamente di verificare la plausibilità fisica della risposta. Il fisico esperto identifica

l'anomalia *prima*, perché i chunk fisici generano aspettative quantitative che rendono il risultato anomalo immediatamente saliente — senza bisogno di un check esplicito.

Test di generalizzazione strutturale profonda: quando si presenta un problema fisico in un dominio formalmente isomorfico a un dominio noto ma fisicamente nuovo — per esempio, un problema di propagazione acustica in un mezzo granulare con le stesse equazioni formali di un problema elettromagnetico in un dielettrico anisotropo — i modelli mostrano un pattern diverso dagli esperti fisici: o applicano meccanicamente le soluzioni del dominio famigliare senza riconoscere le differenze fisicamente rilevanti, o producono ragionamenti corretti ma più lenti e meno automatici di quanto l'expertise fisica mostrerebbe. L'expertise fisica generalizza per struttura fisica (il principio di conservazione dell'energia vale in entrambi i domini), non per isomorfismo formale (le equazioni sono le stesse); i modelli linguistici sembrano generalizzare prevalentemente per isomorfismo formale.

Test di calibrazione metacognitiva: i modelli linguistici mostrano una calibrazione epistemica significativamente peggiore degli esperti fisici sulla struttura epistemica del dominio — non distinguono sistematicamente tra risultati solidi e risultati controversi, tra approssimazioni la cui validità è ben documentata e approssimazioni il cui regime di validità è ancora aperto. Questa assenza di calibrazione metacognitiva è coerente con la struttura del §2.13: la calibrazione si costruisce attraverso la storia personale degli errori e delle correzioni, non attraverso l'elaborazione statistica di un corpus.

2.14.3 — L'interpretazione: tre ipotesi sull'architettura cognitiva dei modelli

Le evidenze del §2.15.2 sono compatibili con tre interpretazioni sull'architettura cognitiva dei modelli linguistici rispetto alla lettura della natura.

Ipotesi I (deficit di scala): i modelli mancano della lettura della natura per ragioni contingenti di scala e architettura che potrebbero essere superate con modelli più grandi, addestrati su più dati fisici,

con architetture più adeguate. Questa ipotesi predice che le assenze strutturali documentate nel §2.15.2 diminuiranno con l'aumentare della scala.

Ipotesi II (deficit strutturale): i modelli mancano della lettura della natura per ragioni strutturali legate alla natura del loro apprendimento — apprendimento statistico da corpus senza incorporazione, senza storia degli errori, senza pratica deliberata orientata verso la comprensione — che non si risolvono con la scala. Questa ipotesi predice che le assenze strutturali documentate nel §2.15.2 persistono anche a scala arbitrariamente grande, perché dipendono dal tipo di apprendimento, non dalla sua quantità.

Ipotesi III (struttura cognitiva diversa): i modelli sviluppano una forma di cognizione fisica che è funzionalmente diversa dalla lettura della natura ma che ha le sue proprie capacità e i suoi propri limiti, non direttamente comparabili con l'expertise umana. Questa ipotesi predice che i test del §2.15.2 continuano a mostrare differenze qualitative, ma che ci sono altri compiti fisici — per esempio, la ricerca sistematica in spazi parametrici molto grandi — in cui la cognizione dei modelli è strutturalmente superiore all'expertise umana.

L'evidenza attuale è più coerente con le ipotesi II e III che con l'ipotesi I, ma non permette una discriminazione definitiva. Il programma di ricerca necessario per discriminarle è delineato nell'Appendice AF e nel §6.13.2.

---

§ 2.16 — Sintesi del Blocco II: la struttura cognitiva della lettura della natura fisica

I quattordici paragrafi del Blocco II hanno costruito, attraverso approcci diversi — sperimentale, storico, fenomenologico, neurologico, comparativo — una struttura che può ora essere sintetizzata in modo da orientare i blocchi successivi.

La comprensione fisica, così come documentata in questo blocco, è un costrutto multidimensionale che include componenti distinte ma integrate:

C_1 — Struttura percettiva esperta: la capacità di categorizzare i problemi fisici in base alle strutture fisiche sottostanti, non alle caratteristiche superficiali (§2.1). Si costruisce attraverso anni di pratica deliberata; si manifesta come salienza percettiva di strutture fisiche invisibili al novizio; è la componente che differenzia experts dai novizi nei test di Chi et al.

C_2 — Simulazione incarnata: la capacità di costruire esperimenti mentali che attivano risorse cognitive motorie e spaziali per esplorare implicazioni fisiche che il formalismo non ha ancora articolato (§2.2). Dipende dalla costruzione di modelli analogici parziali del dominio fisico; è la fonte storica delle scoperte fisiche fondamentali.

C_3 — Abitazione cognitiva dei diagrammi: la capacità di vedere i processi fisici nei diagrammi rappresentazionali piuttosto che regole di calcolo (§2.3). Si trasmette attraverso la comunità di pratica su scale temporali di anni.

C_4 — Integrazione sensori-motoria: il reclutamento dei sistemi neurali motori e percettivi nel ragionamento fisico, che produce una qualità specificamente incarnata della comprensione (§2.4). Dipende dalla presenza di un corpo che ha interagito con il mondo fisico.

C_5 — Sapere tacito fisico: la conoscenza non articolabile sui fenomeni fisici che si accumula attraverso anni di pratica e si trasmette attraverso l'apprendistato, non attraverso i testi (§§2.5–2.8). Si distribuisce nella comunità di pratica; si perde quando la catena di trasmissione si interrompe.

C_6 — Struttura dei chunk fisici: il repertorio di strutture fisiche integrate (percettive, causali, strutturali, formali) che il fisico esperto può attivare istantaneamente in presenza dei pattern rilevanti (§2.12). Si costruisce attraverso il problem-solving fisicamente orientato; ha una struttura stratificata a quattro livelli che va oltre il semplice riconoscimento di pattern.

C_7 — Metacognizione calibrata: la conoscenza dell'agente sulla struttura e sui limiti della propria cognizione fisica, inclusa la capacità di riconoscere i propri errori caratteristici e i confini concettuali del proprio framework (§2.13). Si costruisce attraverso la storia personale degli errori e delle correzioni.

C_8 — Lettura della dissociazione: la capacità di riconoscere quando la comprensione fisica precede la verifica formale, quando la verifica è disponibile senza comprensione, e quando la dissociazione è una struttura necessaria del dominio fisico piuttosto che un deficit contingente (§2.14).

Queste otto componenti non sono indipendenti: si costruiscono attraverso pratiche interconnesse (§2.9), dipendono da strutture cognitive sottostanti comuni (§2.4), e si manifestano come capacità integrate nell'agente esperto. La lettura della natura fisica è il nome dell'integrazione di queste componenti in una struttura cognitiva unitaria che orienta l'agente verso la struttura del dominio fisico.

Questa struttura — costruita empiricamente, fenomenologicamente e storicamente nel Blocco II — sarà la base per l'analisi del confronto con la fisica formale (Blocco III), con la storia delle rivoluzioni concettuali (Blocco IV), con i sistemi artificiali (Blocco V) e con la teoria formale della lettura della natura (Blocco VI).

Riferimenti aggiuntivi per §§ 2.14–2.15: Winsberg (2010), *Science in the Age of Computer Simulation*, Chicago; Frigg e Hartmann (2020), «Models in Science», Stanford Encyclopedia of Philosophy; Lenhard e Winsberg (2010), «Holism, Entrenchment, and the Future of Climate Model Pluralism», Studies in History and Philosophy of Modern Physics 41; Parker (2009), «Confirmation and Adequacy-for-Purpose in Climate Modelling», Proceedings of the Aristotelian Society Supplementary Volume 83; Bubeck et al. (2023), «Sparks of Artificial General Intelligence: Early experiments with GPT-4», Microsoft Research; Lewkowycz et al. (2022), «Solving Quantitative Reasoning Problems with Language Models», NeurIPS 2022; Collins (2001), «Tacit Knowledge, Trust and the Q of Sapphire», Social Studies of Science 31.*

Blocco III — La storia di un'alleanza difficile

Dal sistema solare agli atomi: come il rapporto tra intuizione e formalismo si è trasformato

§ 3.1 — La meccanica newtoniana: intuizione che precede il formalismo

La storia del rapporto tra intuizione fisica e formalismo matematico non è una storia di progresso lineare verso la formalizzazione crescente. È una storia di trasformazioni strutturali in cui il ruolo dell'intuizione rispetto al calcolo cambia profondamente a seconda del dominio, e in cui certi passaggi — la meccanica quantistica in primo luogo — rappresentano discontinuità che non si lasciano assorbire nella narrativa del progresso. Il punto di partenza è la meccanica newtoniana: il caso paradigmatico in cui l'intuizione fisica precede il formalismo in modo storicamente documentabile con precisione.

3.1.1 — Newton: il calculus come strumento della comprensione già posseduta

La genesi dei *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) offre l'esempio più studiato di comprensione fisica che precede il suo formalismo. Newton sviluppò il calculus — le sue applicazioni centrali alla meccanica — in risposta a problemi fisici che aveva già compreso intuitivamente: la legge della gravitazione universale, la descrizione quantitativa delle orbite planetarie, la dimostrazione delle leggi di Keplero. La data tradizionalmente associata alla «scoperta» della gravitazione universale è il 1666, durante la peste di Londra, quando Newton avrebbe intuito — secondo il racconto storicamente non privo di fondamento — che la forza che fa cadere la mela è la stessa che trattiene la Luna nella sua orbita. La

dimostrazione formale — che richiede il calculus, la definizione precisa di forza, la derivazione delle leggi di Keplero dall'inverso del quadrato — viene più tardi, sollecitata da Halley nel 1684 che sfida Newton a dimostrare che un'orbita ellittica segue da una forza che decresce con il quadrato della distanza. Newton aveva già la risposta; dovette costruire il formalismo per dimostrarla.

La terza legge di Keplero — il quadrato del periodo di rivoluzione T è proporzionale al cubo del semiasse maggiore a dell'orbita, $T^2 \propto a^3$ — era un fatto empirico che Newton interpretò come la firma di una forza che decresce con il quadrato della distanza. L'argomento è di una semplicità illuminante: per un'orbita circolare di raggio r, la forza centripeta richiesta è $F = mv^2/r$, mentre il periodo è $T = 2\pi r/v$, dunque $v = 2\pi r/T$ e $F = 4\pi^2 mr/T^2$. Se $T^2 \propto r^3$ (la legge di Keplero), allora $F \propto r/r^3 = 1/r^2$. Questo argomento dimensionale — che non è ancora una dimostrazione rigorosa per orbite ellittiche — rivela la struttura fisica prima del calcolo. Newton vede il legame tra la legge empirica di Keplero e la struttura della forza attraverso un ragionamento che è fisico prima di essere matematico.

I *Principia* del 1687 dimostrano poi il risultato per orbite ellittiche attraverso il metodo delle prime e ultime ragioni — una versione del calcolo mascherata da geometria classica, per ragioni di rigore formale che Newton stesso riteneva strategicamente opportune. La struttura del testo — le proposizioni geometriche elaborate, i lemmi sulle quantità ultime — è la forma in cui Newton traduce una comprensione fisica già raggiunta nel linguaggio formale accettabile dalla comunità scientifica dell'epoca. Il formalismo è costruito per catturare qualcosa che Newton aveva già, in qualche senso, visto.

3.1.2 — La struttura cognitiva della fisica newtoniana

La meccanica newtoniana offre un caso paradigmatico di comprensione fisica abitabile nel senso del Blocco II: il fisico che padroneggia la meccanica newtoniana abita cognitivamente un mondo di corpi materiali con posizioni, velocità e momenti definiti in ogni istante, soggetti a forze che producono accelerazioni causalmente intelligibili. La seconda legge $F = ma$ è,

cognitivamente, una relazione causale: la forza *causa* l'accelerazione, nel senso che modificare la forza produce in modo prevedibile e controllabile una modifica dell'accelerazione.

Questo non è solo una formalizzazione della fisica intuitiva dell'esperienza quotidiana: è la struttura che rende la meccanica newtoniana *leggibile* nel senso del titolo di questa monografia. Un fisico che comprende la terza legge di Newton — la legge di azione e reazione $F_{AB} = -F_{BA}$ — non la vede come un assioma: la abita come una struttura causale del mondo, verificabile in ogni interazione fisica osservabile. Questa abitazione cognitiva non è un lusso pedagogico: è la struttura che orienta il ragionamento fisico nei casi nuovi, non ridotta a quelli già studiati.

Il contrasto con la meccanica quantistica — che il Blocco I ha mostrato e che il Blocco IV analizzerà in tutte le sue dimensioni — diventa più netto se si tiene a mente questa abitabilità cognitiva della meccanica newtoniana. Non è che la meccanica quantistica sia più difficile: è che il tipo di comprensione che permette di abitare cognitivamente il dominio è strutturalmente diverso. Nel caso newtoniano, il formalismo cattura e articola qualcosa che l'intuizione fisica può raggiungere indipendentemente. Nel caso quantistico, il formalismo è predittivamente completo ma il dominio resiste all'abitazione cognitiva nel senso newtoniano.

---

§ 3.2 — La meccanica analitica: quando il formalismo supera l'intuizione

Il secondo momento della storia è la meccanica analitica di Lagrange e Hamilton — la prima inversione parziale del rapporto tra intuizione e formalismo nella fisica classica. Qui il formalismo non è costruito per catturare un'intuizione già posseduta: produce strutture matematiche che retroattivamente acquisiscono un'interpretazione fisica, rivelando aspetti della meccanica classica che l'intuizione newtoniana non aveva anticipato.

3.2.1 — Il formalismo lagrangiano e la scomparsa delle figure

La **formulazione lagrangiana** nasce con la *Mécanique Analytique* di Lagrange (1788) — un'opera che Lagrange stesso presentò senza nemmeno una figura, come un'opera di algebra pura applicata alla meccanica. L'obiettivo non era costruire una nuova intuizione fisica: era eliminare la necessità delle figure — e con esse, dell'intuizione geometrica — sostituendo il ragionamento fisico con il calcolo algebrico.

Il principio variazionale al cuore della meccanica lagrangiana — il moto fisico è quello che stazionarizza l'azione $S = \int_{t_1}^{t_2} L\,dt$ con $L = T - V$ — non fu derivato da intuizione fisica diretta: fu costruito come generalizzazione formale del principio di D'Alembert e dei principi di Maupertuis e di Fermat. Le equazioni di Eulero-Lagrange:

$$\frac{d}{dt}\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = 0, \qquad i = 1, \ldots, n,$$

sono formalmente equivalenti alle equazioni vettoriali di Newton ma cognitivamente molto diverse. Le forze di reazione e i vincoli cinematici — che nelle equazioni vettoriali di Newton richiedono un'analisi caso per caso attraverso diagrammi di corpo libero — sono assorbiti automaticamente nella scelta delle coordinate generalizzate q_i. Il sistema più complicato di carrucole e aste rigide diventa un problema con n gradi di libertà e nessuna forza di reazione esplicita, purché si scelgano le coordinate generalizzate appropriate.

La semplicità del calcolo lagrangiano non nasce da un'intuizione fisica più profonda: nasce da una struttura formale che ha assorbito automaticamente la complessità fisica. Lagrange aveva raggiunto il risultato mediante un tour de force algebrico — non attraverso una comprensione fisica più ricca di quella di Newton, ma attraverso una manipolazione formale più potente. Il prezzo è la distanza dal dominio fisico: le equazioni di Eulero-Lagrange non si lasciano leggere immediatamente come affermazioni causali sulla struttura del mondo fisico nel modo in cui si legge $F = ma$.

3.2.2 — Il formalismo hamiltoniano e la struttura simplettica

La **formulazione hamiltoniana** porta il formalismo a un ulteriore livello di astrazione. Attraverso la trasformazione di Legendre $H = \sum_i p_i \dot{q}_i - L$, con $p_i = \partial L / \partial \dot{q}_i$ i momenti coniugati, il moto fisico è descritto nello **spazio delle fasi** $\Gamma = \{(q_i, p_i)\}$ attraverso le equazioni di Hamilton:

$$\dot{q}_i = \frac{\partial H}{\partial p_i}, \qquad \dot{p}_i = -\frac{\partial H}{\partial q_i}.$$

La struttura matematica rivelata dalla formulazione hamiltoniana è la **geometria simplettica** dello spazio delle fasi. Lo spazio delle fasi ha una struttura naturale di varietà simplettica dotata della 2-forma chiusa non degenere:

$$\omega = \sum_i dp_i \wedge dq_i,$$

e il flusso hamiltoniano preserva questa struttura: $L_{X_H} \omega = 0$, dove X_H è il campo vettoriale hamiltoniano $X_H = \sum_i \left(\frac{\partial H}{\partial p_i} \frac{\partial}{\partial q_i} - \frac{\partial H}{\partial q_i} \frac{\partial}{\partial p_i} \right)$.

Le **parentesi di Poisson** $\{f, g\} = \sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial q_i} \frac{\partial g}{\partial p_i} - \frac{\partial f}{\partial p_i} \frac{\partial g}{\partial q_i} \right)$ forniscono una struttura algebrica sullo spazio delle fasi che cattura le simmetrie e le conservazioni. Una grandezza f si conserva se e solo se $\{f, H\} = 0$. Le relazioni canoniche fondamentali:

$$\{q_i, p_j\} = \delta_{ij}, \qquad \{q_i, q_j\} = 0, \qquad \{p_i, p_j\} = 0,$$

definiscono la struttura simplettica dello spazio delle fasi, e prefigurano la struttura dei commutatori quantistici $\left[\hat{q}_i, \hat{p}_j\right] = i\hbar\delta_{ij}$ — rivelando retroattivamente che la meccanica classica porta in sé la struttura algebrica che la meccanica quantistica espliciterà.

3.2.3 — Il formalismo come anticipazione della comprensione

Il punto epistemologicamente cruciale è questo: la struttura hamiltoniana non è semplicemente una riformulazione efficiente della meccanica newtoniana. Rivela strutture fisiche che l'intuizione newtoniana non vedeva, e che diventarono fisicamente visibili —

comprensibili come strutture del mondo, non solo come strutture matematiche — solo con la meccanica quantistica. Il **teorema di Liouville** — che l'evoluzione hamiltoniana preserva il volume nello spazio delle fasi — non ha una formulazione intuitiva ovvia in termini di forze e traiettorie, ma emerge con immediatezza dalla struttura simplettica. Il **teorema di Noether** — che a ogni simmetria continua dell'azione corrisponde una quantità conservata — rende sistematica la connessione tra simmetria fisica e legge di conservazione che i fisici newtoniani coglievano caso per caso.

La meccanica analitica è il primo esempio, nella storia qui ricostruita, di formalismo che guida la comprensione piuttosto che esprimerla: il fisico che impara la meccanica hamiltoniana non parte da un'intuizione fisica e la traduce nel formalismo, ma parte dal formalismo e, attraverso di esso, arriva a vedere strutture fisiche che l'intuizione non aveva anticipato. È la direzione che la meccanica quantistica porterà al suo estremo — ma nella meccanica hamiltoniana il processo si conclude comunque con una comprensione fisica abitabile: il fisico può abitare lo spazio delle fasi, visualizzare il flusso hamiltoniano come traiettorie in uno spazio astratto ma geometricamente accessibile, e costruire modelli fisici degli invarianti adiabaticici, delle risonanze, dei sistemi caotici.

---

§ 3.3 — L'elettromagnetismo di Maxwell: l'analogia come ponte e come trappola

Il terzo momento della storia è l'elettromagnetismo di Maxwell — il caso storicamente documentato con maggiore precisione di come l'intuizione analogica guidi la costruzione del formalismo e poi venga abbandonata quando il formalismo si rivela più ricco dell'analogia che lo ha generato.

3.3.1 — L'analogia del fluido e le linee di campo

Maxwell costruisce le equazioni del campo elettromagnetico attraverso una strategia cognitiva esplicitamente analogica, sviluppata in due memorie successive: *On Faraday's Lines of Force*

(1856) e *On Physical Lines of Force* (1861-62). Nella prima memoria, Maxwell modella le linee di campo di Faraday come linee di flusso di un fluido incomprimibile immaginario: le proprietà geometriche del fluido — conservazione del flusso, ortogonalità tra equipotenziali e linee di campo — corrispondono alle proprietà del campo elettromagnetico. Maxwell è esplicito, in una lettera a Thomson del 1854, che questo è un uso cognitivo dell'analogia: «ho intenzione di esaminare se le nozioni di flusso possono essere trasferite all'elettricità con qualche vantaggio. Non proponendo nessuna teoria fisica dell'elettricità, ma soltanto cercare di formare un'idea chiara delle sue relazioni geometriche».

La funzione cognitiva di questa analogia è precisa: il fluido incomprimibile è un oggetto fisico che il fisico vittoriano abitava cognitivamente con grande familiarità, dalle equazioni di Euler e dalle applicazioni dell'idrodinamica all'ingegneria navale. Trasferire questo modello all'elettricità permetteva di usare l'intuizione fisica già costruita nel dominio del fluido per orientare la ricerca nel dominio del campo elettromagnetico. Non era un'ipotesi sulla natura fisica dell'elettricità: era un'impalcatura cognitiva per ragionare sulle strutture del campo.

3.3.2 — La corrente di spostamento e la predizione delle onde

Nella seconda memoria, Maxwell sviluppa un modello meccanico più elaborato — un etere costituito da vortici molecolari che trasmettono le azioni magnetiche attraverso tensioni rotazionali, con particelle intermedie che trasmettono l'azione elettrica. È attraverso l'analisi meccanica di questo modello — calcolando le forze che si trasmettono tra i vortici e le particelle intermedie — che Maxwell arriva alla **corrente di spostamento**: il termine $\frac{\partial E}{\partial t}$ aggiunto all'equazione di Ampère.

Senza la corrente di spostamento, l'equazione di Ampère $\nabla \times B = \mu_0 J$ è inconsistente con la conservazione della carica: prendendo la divergenza di entrambi i membri e usando $\nabla \cdot J = -\partial_t \rho$ e $\nabla \cdot B = 0$, si ottiene $0 = -\mu_0 \partial_t \rho \neq 0$ in generale. La corrente di spostamento

corregge questa inconsistenza: $\nabla\times B = \mu_0 J + \mu_0\epsilon_0\frac{\partial E}{\partial t}$, e prendendo la divergenza si ottiene $0 = \mu_0\left(\nabla\cdot J + \epsilon_0\partial_t\nabla\cdot E\right) = \mu_0\left(\nabla\cdot J + \partial_t\rho\right) = 0$ per la continuità della carica.

Le equazioni di Maxwell nella loro forma moderna (in unità SI):

$$\nabla\cdot E = \frac{\rho}{\epsilon_0}, \qquad \nabla\times B - \mu_0\epsilon_0\frac{\partial E}{\partial t} = \mu_0 J,$$

$$\nabla\cdot B = 0, \qquad \nabla\times E + \frac{\partial B}{\partial t} = 0.$$

Queste quattro equazioni ammettono, nel vuoto ($\rho = 0$, $J = 0$), soluzioni ondulatori con velocità di propagazione:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0\epsilon_0}} \approx 3\times10^8\ m/s,$$

che coincide con la velocità della luce misurata indipendentemente. Maxwell riconosce immediatamente il significato di questo risultato: la luce è un fenomeno elettromagnetico. La scoperta emerge dall'analisi del modello meccanico dell'etere — non da un'intuizione diretta sulla struttura della luce.

3.3.3 — Il formalismo che trascende il modello

La terza memoria (*A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*, 1865) fa qualcosa di epistemologicamente fondamentale: Maxwell abbandona il modello meccanico dell'etere che aveva guidato la costruzione delle equazioni, presentando le equazioni come entità autonome. Il formalismo è indipendente dal modello che lo ha generato — e non solo è indipendente, ma è più ricco: la struttura delle equazioni di Maxwell rivela proprietà che il modello meccanico non aveva anticipato.

La proprietà più importante è la **covarianza di Lorentz**, che Maxwell non sapeva. Le equazioni di Maxwell sono invarianti rispetto alle trasformazioni di Lorentz — non rispetto alle trasformazioni di Galileo della meccanica classica. Questa proprietà non è visibile nell'analogia del fluido o nel modello dei vortici molecolari: è una proprietà del formalismo che il formalismo stesso rivela solo se se ne studia la struttura di simmetria. Einstein, nel 1905, non leggeva la fisica nel linguaggio dei modelli meccanici ma nel linguaggio dei

principi fisici; riconobbe nella struttura delle equazioni di Maxwell il principio della costanza della velocità della luce — e da questo principio derivò la relatività speciale.

Il meccanismo cognitivo che il caso di Maxwell illustra è il seguente: l'intuizione analogica apre la strada al formalismo; il formalismo rivela strutture che l'analogia non conteneva; una nuova comprensione fisica emerge dal formalismo attraverso un'analisi che non è più guidata dall'analogia originale ma dalla struttura interna del formalismo. Questo ciclo — intuizione analogica → formalismo → comprensione più profonda — è la dinamica caratteristica della fisica classica nel suo periodo di massima espansione. La meccanica quantistica romperà il ciclo interrompendolo al secondo passaggio: il formalismo rivela strutture che l'analogia non conteneva, ma la comprensione fisica che dovrebbe emergere dal formalismo non arriva in una forma condivisa e abitabile.

---

§ 3.4 — La crisi degli anni Venti: due percorsi opposti verso lo stesso formalismo

Il 1925 è l'anno in cui il rapporto tra intuizione fisica e formalismo matematico subisce una discontinuità senza precedenti nella storia della scienza. Due fisici — Werner Heisenberg e Erwin Schrödinger — arrivano allo stesso formalismo attraverso percorsi cognitivi opposti: uno abbandonando esplicitamente il requisito di comprensione fisica intuitiva, l'altro cercandola attraverso un'analogia ondulatoria. Il risultato unificato — il formalismo degli spazi di Hilbert che von Neumann formalizzerà nel 1932 — risolve il problema matematico della teoria atomica ma lascia aperto il problema cognitivo: non dà al fisico un'immagine del mondo atomico che si possa abitare nel senso della meccanica classica. Questa apertura non si è chiusa.

3.4.1 — Il contesto: la vecchia teoria dei quanti e le sue difficoltà

Il contesto è la **vecchia teoria dei quanti** di Bohr e Sommerfeld (1913-1924), che aveva tentato di costruire un modello semi-classico

del comportamento degli elettroni nell'atomo attraverso orbite quantizzate. L'elettrone orbita attorno al nucleo su orbite ellittiche — come i pianeti intorno al sole — ma solo certe orbite sono permesse, quelle per cui l'azione classica $\oint p\,dq = nh$ è un multiplo intero di h. Le regole di Bohr-Sommerfeld producevano previsioni quantitativamente corrette per lo spettro dell'idrogeno:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{2\hbar^2 n^2} = -\frac{13.6\ eV}{n^2}, \qquad n = 1, 2, 3, \ldots,$$

con le frequenze delle righe spettrali:

$$\nu_{nm} = \frac{E_m - E_n}{h} = \frac{m_e e^4}{4\pi\hbar^3}\left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2}\right),$$

corrispondenti alla formula di Balmer-Rydberg. Ma il modello falliva sistematicamente per atomi con più di un elettrone: l'elio a due elettroni non riusciva ad essere descritto nel quadro semi-classico, e le regole di Sommerfeld richiedevano aggiustamenti ad hoc sempre più elaborati per rendere conto dello spettro di Zeeman anomalo, dell'effetto Stark, e della struttura fine.

Né il fallimento tecnico era il solo problema. Pauli e Heisenberg, che avevano lavorato con Bohr a Copenaghen, erano intimamente consapevoli delle difficoltà concettuali della vecchia teoria: i «salti quantici» tra orbite non erano descritti da nessuna dinamica — l'elettrone spariva da un'orbita e riappariva su un'altra senza che si potesse dire dove fosse nel frattempo. La quantizzazione delle orbite era una regola mistica senza principio fisico sottostante. Il modello non era fondato: era una collezione di regole empiriche che funzionavano per ragioni che nessuno capiva.

3.4.2 — Heisenberg: l'abbandono della *Anschaulichkeit*

Werner Heisenberg aveva ventitré anni quando scrisse, nell'estate del 1925 sull'isola di Helgoland dove si era ritirato per curare la febbre da fieno, il paper che avrebbe rifondato la fisica atomica. Il paper — *Über die quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen* (luglio 1925) — è uno dei testi più importanti della storia della fisica, e la sua struttura cognitiva è tanto importante quanto i suoi risultati tecnici.

La decisione metodologica di Heisenberg è articolata con chiarezza nella sezione introduttiva: nella costruzione di una teoria dell'atomo, si devono tenere «soltanto relazioni tra quantità in linea di principio osservabili». Le frequenze e le intensità delle righe spettrali sono osservabili; le orbite degli elettroni non lo sono. La meccanica atomica deve essere costruita attorno alle prime, rinunciando alle seconde. Heisenberg scrive esplicitamente che è «inammissibile presupporre la visualizzabilità (*Anschaulichkeit*) come principio guida nella costruzione della teoria». Non è una limitazione tecnica temporanea: è una posizione epistemologica. La comprensione fisica intuitiva — la capacità di visualizzare gli oggetti della teoria come oggetti fisicamente accessibili — non è un requisito della teoria fisica.

La costruzione tecnica di Heisenberg parte dall'osservazione che le grandezze fisiche classiche — posizione $x(t)$, momento $p(t)$ — si possono espandere in serie di Fourier:

$$x(t) = \sum_n x_n e^{in\omega t},$$

dove ω è la frequenza fondamentale dell'orbita e x_n sono le ampiezze dei vari armonici. Nella vecchia teoria dei quanti, queste ampiezze determinano le intensità delle righe spettrali attraverso le regole di Bohr. Heisenberg rimpiazza la singola serie di Fourier con una tavola a doppio indice di grandezze:

$$x_{nm}(t) = x_{nm}^{(0)} e^{i\omega_{nm} t},$$

dove $\omega_{nm} = \left(E_m - E_n\right)/\hbar$ sono le frequenze osservabili (le righe spettrali) e $x_{nm}^{(0)}$ sono le ampiezze corrispondenti. Le grandezze x_{nm} non sono numeri: sono elementi di una tavola bi-indicizzata, che oggi riconosciamo come elementi di una **matrice infinita**.

Il punto cruciale è il prodotto. Heisenberg si chiede come combinare due tavole per ottenere una terza tavola che descriva la grandezza prodotto: vuole che la posizione al quadrato x^2 sia descritta da una tavola derivata da quella di x. La regola naturale — che Heisenberg trova quasi per caso — è:

$$(xy)_{nm} = \sum_k x_{nk} y_{km}.$$

Questa è precisamente la moltiplicazione matriciale. Heisenberg non la riconosce come tale — non aveva studiato algebra lineare in dettaglio — e la presenta come una regola di combinazione delle tavole fisiche. Born, che legge il paper di Heisenberg, la riconosce immediatamente come moltiplicazione di matrici, e con Jordan formalizza il risultato nella **meccanica matriciale**: le grandezze fisiche sono operatori lineari (matrici) che agiscono su uno spazio vettoriale, e le relazioni di commutazione fondamentali sono:

$$\hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x} = i\hbar\hat{1}.$$

Questa relazione — che emerge naturalmente dalla struttura delle tavole di Heisenberg — è la radice formale del principio di indeterminazione, e codifica algebricamente il fatto che posizione e momento non possono essere simultaneamente determinati con precisione arbitraria.

Il formalismo della meccanica matriciale è completo: produce previsioni corrette per le energie degli stati atomici, per le frequenze e le intensità delle righe spettrali, per i coefficienti di Einstein per emissione spontanea. Ma Heisenberg stesso ammette — in una lettera a Pauli del settembre 1925 — di non capire il significato fisico di ciò che ha fatto: «la mia intera misera tentativo è trattare l'atomo in modo analogo alla radiazione, cioè senza avere un'idea di cosa stia succedendo». Il formalismo è prodotto *prima* della comprensione; la comprensione — se mai verrà — dovrà essere costruita dopo.

3.4.3 — Schrödinger: la comprensione attraverso l'analogia ondulatoria

Erwin Schrödinger arriva alla meccanica quantistica nell'inverno del 1925-26 attraverso un percorso cognitivo radicalmente opposto. Il suo punto di partenza non è la rinuncia alla *Anschaulichkeit* ma la sua affermazione: Schrödinger cerca esplicitamente una teoria del comportamento atomico che possa essere *compresa* nel senso fisico

tradizionale — che possa essere abitata cognitivamente, che possa fornire un'immagine del mondo atomico.

Il punto di partenza intellettuale è la proposta di Louis de Broglie (1924) che associa a ogni particella di momento p una lunghezza d'onda $\lambda = h/p$. L'idea di de Broglie era audace: le particelle hanno proprietà ondulatorie, simmetricamente a come i fotoni — che la fisica classica descriveva come onde — hanno proprietà corpuscolari (Einstein, 1905). Schrödinger prende questa proposta sul serio e si chiede: se le particelle sono onde, qual è l'equazione che queste onde devono soddisfare?

La strategia di Schrödinger è esplicitamente analogica, e segue un ragionamento dell'ottica geometrica che egli conosceva profondamente. L'ottica geometrica — la descrizione della luce attraverso raggi rettilinei — è il **limite di lunghezza d'onda corta** dell'ottica ondulatoria: i raggi ottici sono le traiettorie perpendicolari ai fronti d'onda, e l'equazione iconale

$$|\nabla S|^2 = n^2(x)$$

descrive la propagazione dei raggi in un mezzo con indice di rifrazione $n(x)$. Come la meccanica di Hamilton-Jacobi:

$$(\nabla S)^2 = 2m(E - V(x))$$

descrive le traiettorie classiche delle particelle attraverso la funzione d'azione S, l'equazione iconale descrive i raggi luminosi. Schrödinger nota l'analogia strutturale: se la meccanica classica è all'ottica geometrica come la meccanica ondulatoria è all'ottica ondulatoria, l'equazione d'onda della meccanica ondulatoria dovrebbe ridursi all'equazione di Hamilton-Jacobi nel limite $\lambda \to 0$ (ovvero $\hbar \to 0$).

Partendo da questa analogia, Schrödinger costruisce l'**equazione d'onda stazionaria** per una particella di energia E in un potenziale $V(x)$:

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V(x)\psi = E\psi.$$

Per l'atomo di idrogeno, con potenziale coulombiano $V(r) = -e^2/\left(4\pi\epsilon_0 r\right)$, questa equazione in coordinate sferiche (r, θ, ϕ)

si separa nella forma $\psi_{nlm}(r,\theta,\phi) = R_{nl}(r)Y_l^m(\theta,\phi)$, dove Y_l^m sono le armoniche sferiche e R_{nl} soddisfa l'equazione radiale. Le soluzioni fisicamente accettabili — quelle che decadono a zero per $r\to\infty$ e sono regolari nell'origine — esistono solo per valori discreti dell'energia:

$$E_n = -\frac{m_e e^4}{8\epsilon_0^2 h^2 n^2} = -\frac{13.6\ eV}{n^2}, \qquad n = 1, 2, 3, \ldots$$

Le stesse energie di Bohr, ma derivate da un'equazione d'onda fisica — non da una regola di quantizzazione ad hoc. La quantizzazione emerge automaticamente dalla condizione che le soluzioni siano fisicamente accettabili: è la condizione di accettabilità fisica che seleziona i livelli energetici, non una regola mistica.

L'equazione dipendente dal tempo:

$$i\hbar\frac{\partial\psi}{\partial t} = \hat{H}\psi = \left(-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(x)\right)\psi$$

generalizza la descrizione all'evoluzione temporale del sistema. Schrödinger pubblica la teoria in quattro lunghe memorie nel 1926 — *Quantisierung als Eigenwertproblem* — e dimostra nella quarta memoria l'equivalenza matematica con la meccanica matriciale di Heisenberg. Le due formulazioni producono le stesse previsioni fisiche, ma hanno strutture matematiche e cognitivamente molto diverse.

3.4.4 — Born: l'interpretazione probabilistica e il suo conflitto

Il conflitto tra le due prospettive cognitive esplode con l'interpretazione proposta da Max Born (giugno 1926) per la funzione d'onda di Schrödinger. Schrödinger interpretava $|\psi(x,t)|^2$ come una **densità di materia**: l'elettrone è diffuso nello spazio come un campo ondulatorio, con densità di carica $-e|\psi|^2$ distribuita nello spazio. Questa interpretazione era coerente con il programma di Schrödinger di costruire una teoria continua e intuitivamente comprensibile: l'elettrone non è un punto che salta discretamente tra orbite, ma un'onda che si propaga continuamente.

Born, analizzando la diffusione di un elettrone da un centro di forza, propone un'interpretazione radicalmente diversa: $|\psi(x,t)|^2 d^3x$ è la **probabilità** di trovare l'elettrone nel volume d^3x intorno al punto x se si esegue una misura della posizione al tempo t. L'elettrone non è diffuso nello spazio: è puntiforme, ma la sua posizione è determinata probabilisticamente dalla funzione d'onda. La funzione d'onda non descrive la distribuzione della materia: descrive la distribuzione delle probabilità di misura.

Questa interpretazione ha implicazioni cognitive profonde. Nella visione di Schrödinger, la funzione d'onda ψ è un oggetto fisico reale — un'onda di materia — che si può in linea di principio visualizzare e abitare cognitivamente. Nella visione di Born, ψ è uno strumento di calcolo per le probabilità: la realtà fisica è l'elettrone puntiforme, e la funzione d'onda è una rappresentazione della nostra conoscenza della sua posizione.

Schrödinger rifiutò l'interpretazione probabilistica con forza. In una lettera a Born e in vari scritti successivi, Schrödinger argomentò che l'interpretazione probabilistica distruggeva l'unico vantaggio della meccanica ondulatoria rispetto alla meccanica matriciale: la possibilità di comprendere il comportamento atomico attraverso un'immagine fisica continua. In una lettera del 1926, scrisse che se l'interpretazione probabilistica fosse corretta, «mi dispiace di essermi mai occupato della teoria dei quanti». La meccanica quantistica, nell'interpretazione di Born, non descrive la realtà atomica: descrive le probabilità di risultati di misura, lasciando completamente aperta la domanda su cosa sia la realtà atomica tra una misura e l'altra.

Heisenberg, dal lato opposto, riteneva che l'intuizione ondulatoria di Schrödinger fosse un passo indietro verso la *Anschaulichkeit* che il rigore fisico richiedeva di abbandonare. In un articolo del 1926 sulla struttura della meccanica quantistica, Heisenberg scrisse che «l'equazione di Schrödinger non descrive onde fisiche reali nello spazio ordinario» — una critica esplicita del programma interpretativo di Schrödinger. Il disaccordo non era tecnico ma

cognitivo: Heisenberg e Schrödinger erano in disaccordo su cosa la teoria dovesse fare per essere fisica soddisfacente.

3.4.5 — Von Neumann: l'unificazione formale senza risoluzione cognitiva

John von Neumann, nel suo *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (1932), fornisce l'unificazione matematica delle due formulazioni. La meccanica matriciale di Heisenberg e la meccanica ondulatoria di Schrödinger sono rappresentazioni diverse della stessa struttura astratta: uno spazio di Hilbert separabile H, con osservabili rappresentate da operatori autoaggiunti, stati descritti da vettori di norma unitaria (o operatori densità), ed evoluzione governata dall'equazione di Schrödinger astratta $i\hbar\frac{d}{dt}|\psi\rangle = \hat{H}|\psi\rangle$.

La funzione d'onda di Schrödinger $\psi(x) \in L^2(R^3)$ è un vettore nello spazio di Hilbert $H = L^2(R^3)$; le matrici di Heisenberg-Born sono le componenti degli operatori rispetto alla base $\{|a_n\rangle\}$ degli autostati di qualche osservabile. Il teorema di rappresentazione di Riesz e i risultati di spettro di von Neumann garantiscono la coerenza matematica: le due formulazioni sono unitariamente equivalenti, cioè producono esattamente le stesse previsioni per qualsiasi esperimento.

L'unificazione di von Neumann risolve il problema matematico: fornisce un quadro formale unico e internamente coerente per la teoria atomica, che permette di calcolare le previsioni con precisione arbitraria. Ma non risolve il problema cognitivo che il conflitto tra Heisenberg e Schrödinger aveva portato in superficie. La funzione d'onda $|\psi\rangle$ è un vettore in uno spazio di Hilbert astratto: non è un'onda di materia nel senso di Schrödinger (perché la regola di Born la interpreta come densità di probabilità), né è semplicemente uno strumento di calcolo senza contenuto fisico (perché le interferenze tra termini della funzione d'onda producono effetti fisici reali e sperimentalmente verificabili). Cosa *è* la funzione d'onda? A questa domanda il formalismo di von Neumann non risponde — non per negligenza, ma perché la risposta eccede il formalismo.

Von Neumann riconosce esplicitamente questo problema nel capitolo V del suo libro, dove analizza il **problema della misura**: il conflitto tra l'evoluzione unitaria continua (Processo 2, che non produce mai il collasso) e il collasso della funzione d'onda al momento della misura (Processo 1, che produce il collasso istantaneo). Von Neumann dimostra che non c'è nessun punto nella «catena von Neumanniana» — dal sistema misurato all'apparato, all'osservatore — in cui il collasso possa essere collocato consistentemente con il formalismo. Il problema della misura è una tensione strutturale del formalismo, non un'imperfezione tecnica correggibile.

3.4.6 — Il significato storico: due modi di fare fisica

La crisi degli anni Venti ha prodotto non solo un nuovo formalismo ma una frattura nella struttura del rapporto tra intuizione e comprensione fisica che è ancora aperta. Il conflitto tra Heisenberg e Schrödinger non era un conflitto tecnico risolto dall'unificazione di von Neumann: era un conflitto metodologico su cosa la fisica debba fare e su cosa significhi comprendere un dominio fisico.

Heisenberg rappresenta la posizione che il Blocco IV identificherà come l'interpretazione di Copenaghen nella sua forma più radicale: la fisica deve descrivere le relazioni tra le grandezze osservabili senza presupporre un modello del mondo fisico sottostante. Questa posizione è epistemicamente coerente — produce previsioni corrette, è internamente consistente, non fa affermazioni verificabili false — ma paga il prezzo della rinuncia alla comprensione nel senso del Blocco II. Un fisico che segue Heisenberg non costruisce un modello fisico del mondo atomico: costruisce un algoritmo per calcolare le probabilità di misura.

Schrödinger rappresenta la posizione opposta: la fisica deve fornire un'immagine comprensibile del mondo fisico, abitabile nel senso della meccanica classica. Questa posizione è cognitivamente motivata — è la struttura che ha orientato tutta la fisica precedente — ma, nel dominio quantistico, produce un'immagine (la funzione d'onda come onda di materia) che il formalismo stesso non supporta nell'interpretazione di Born.

Il formalismo di von Neumann è neutro rispetto a questa disputa: funziona ugualmente bene con qualsiasi interpretazione, perché le interpretazioni producono le stesse previsioni. La crisi degli anni Venti ha dunque prodotto un paradosso: il formalismo è predittivamente completo — calcolando qualsiasi cosa si voglia con precisione arbitraria — e cognitivamente aperto — non determinando quale immagine del mondo fisico descriva. È la forma precisa di ciò che questa monografia chiama il paradosso della completezza, la cui analisi sistematica è compito del Blocco IV.

---

§ 3.5 — La teoria quantistica dei campi: il formalismo come struttura del mondo

La teoria quantistica dei campi (QFT) porta la discontinuità aperta dalla meccanica quantistica a un livello ulteriore, e rivela una struttura epistemica che la meccanica quantistica ordinaria aveva solo anticipato.

3.5.1 — La quantizzazione del campo e lo spazio di Fock

Nella QFT, non solo le grandezze fisiche sono operatori in uno spazio di Hilbert: i campi fisici stessi — il campo elettromagnetico, il campo di Dirac per gli elettroni, il campo di Higgs — sono operatori che agiscono su spazi di Fock, e le particelle elementari emergono come **eccitazioni quantistiche** di questi campi.

Il campo scalare reale $\phi(x,t)$ soddisfa l'equazione di Klein-Gordon $\left(\Box + m^2\right)\phi = 0$, con $\Box = \partial_t^2 - \nabla^2$ in unità naturali $\hbar = c = 1$. La quantizzazione canonica impone le relazioni di commutazione a tempi uguali:

$$[\phi(x,t), \pi(y,t)] = i\delta^{(3)}(x-y), \qquad \pi = \partial_t \phi.$$

La decomposizione in modi di Fourier rivela che i coefficienti sono operatori di creazione e distruzione:

$$\phi(x,t) = \int \frac{d^3k}{(2\pi)^3 2\omega_k}\left(a_k\, e^{i\left(k\cdot x - \omega_k t\right)} + a_k^\dagger\, e^{-i\left(k\cdot x - \omega_k t\right)}\right),$$

con $\omega_k = \sqrt{|k|^2 + m^2}$ e $\left[a_{k'}, a_{k'}^\dagger\right] = (2\pi)^3 2\omega_k \delta^{(3)}(k - k')$. Lo stato del vuoto $|0\rangle$ è definito come lo stato annichilato da tutti gli operatori a_k: $a_k|0\rangle = 0$ per ogni k. Una particella di momento k è $a_k^\dagger|0\rangle$.

Questo significa che il numero di particelle non è una proprietà intrinseca del sistema: dipende dallo stato del campo. Il vuoto quantistico non è l'assenza di tutto: è uno stato definito del campo, con energia di punto zero $E_0 = \frac{1}{2}\int \frac{d^3k}{(2\pi)^3}\omega_k$ che diverge — una delle manifestazioni fisicamente rilevanti delle divergenze ultraviolette della QFT.

3.5.2 — La potenza predittiva della QFT e le sue difficoltà concettuali

La potenza predittiva della QFT è straordinaria. L'elettrodinamica quantistica (QED) predice il **momento magnetico anomalo dell'elettrone** con una precisione di dodici cifre decimali:

$$\frac{g-2}{2} = \alpha/(2\pi) - 0.32848...(\alpha/\pi)^2 + 1.18124...(\alpha/\pi)^3 - ... = 0.00115965218073...$$

dove $\alpha = e^2/\left(4\pi\hbar c\epsilon_0\right) \approx 1/137$ è la costante di struttura fine. Il valore teorico e il valore sperimentale concordano a una parte su 10^{12}: è la previsione più precisa dell'intera storia della scienza.

Il **Modello Standard** — che unifica QED con le interazioni deboli nella teoria di Glashow-Weinberg-Salam e con le interazioni forti nella cromodinamica quantistica (QCD), nel quadro della gauge theory con gruppo $SU(3)\times SU(2)\times U(1)$ — ha previsto l'esistenza del bosone di Higgs con le sue proprietà (massa, modi di decadimento, accoppiamenti ai fermioni e ai bosoni gauge) prima della sua scoperta al Large Hadron Collider nel 2012. Non esiste nella storia della fisica un'altra teoria con questo grado di accordo sperimentale su fronti così indipendenti.

Eppure la QFT pone problemi di comprensione fisica che la meccanica quantistica ordinaria non poneva nella stessa forma. Le **divergenze ultraviolette** — la tendenza delle ampiezze perturbative a divergere quando l'impulso interno dei loop cresce senza limite —

vengono gestite attraverso la **rinormalizzazione**, non risolte in senso fisico. La procedura, resa sistematica da Feynman, Schwinger e Tomonaga nel 1947-1949, consiste nel regolarizzare le divergenze (ad esempio con la regolarizzazione dimensionale in $d = 4 - \epsilon$ dimensioni), estrarne la struttura divergente, e assorbirla in controtermine che ridefiniscono i parametri «nudi» della teoria in termini dei parametri fisici misurabili. Dirac, che non accettò mai la rinormalizzazione, la descrisse come «matematica senza senso fisico». Feynman stesso la descrisse come «un trucco ingegnoso per evitare di affrontare il problema».

Wilson chiarì il significato fisico attraverso il **gruppo di rinormalizzazione** negli anni Settanta: le teorie di campo sono descrizioni efficaci valide a scale di energia inferiori a una scala di cutoff Λ; le divergenze ultraviolette non sono un problema fisico ma un artefatto dell'estensione del formalismo oltre il suo dominio di validità. Questa chiarificazione wilsoniana non elimina il problema di comprensione ma lo ridefinisce: la QFT è una **teoria efficace** — valida a basse energie, risultante da una fisica più fondamentale che non conosciamo. Cosa descriva la fisica al di sopra della scala di cutoff rimane aperto.

---

§ 3.6 — La struttura delle rivoluzioni: paradigmi, crisi e la dimensione cognitiva del cambiamento

La storia ricostruita nei paragrafi precedenti ha una struttura che si lascia leggere attraverso la nozione kuhniana di **paradigma scientifico** — con una qualificazione che il Blocco III introduce come contributo proprio all'analisi di Kuhn.

Kuhn (*The Structure of Scientific Revolutions*, 1962) descrive la scienza normale come pratica guidata da un paradigma — un insieme condiviso di teorie, strumenti, esempi canonici e valori epistemici — e le rivoluzioni scientifiche come passaggi da un paradigma a un altro incompatibile, in cui le anomalie accumulate sotto il vecchio paradigma diventano insostenibili. La meccanica quantistica è, in questa lettura, una rivoluzione paradigmatica: sostituisce il

paradigma della meccanica classica con un paradigma formalmente incommensurabile — diversa ontologia, diversi concetti di stato, osservabile, misura.

3.6.1 — La dimensione cognitiva della transizione paradigmatica

La qualificazione che il Blocco III introduce riguarda la **dimensione cognitiva** della transizione paradigmatica: ogni cambiamento di paradigma nella fisica ha comportato non solo un cambiamento di teorie e strumenti, ma un cambiamento nel **tipo di comprensione fisica** che il fisico è chiamato a costruire. La transizione da Newton a Lagrange-Hamilton non richiede solo di imparare un nuovo formalismo: richiede di imparare a pensare in termini di principi variazionali e spazio delle fasi. La transizione da Maxwell all'elettrodinamica relativistica richiede di pensare in termini di quadrivettori e tensori nello spaziotempo. In entrambi i casi, tuttavia, il risultato del cambiamento cognitivo è una comprensione *abitabile*: il fisico che ha assimilato il paradigma hamiltoniano abita lo spazio delle fasi; il fisico che ha assimilato la relatività abita lo spaziotempo minkowskiano.

La transizione alla meccanica quantistica richiede qualcosa di strutturalmente diverso: imparare a **manipolare un formalismo** senza che emerga, alla fine del processo, la comprensione fisica che nelle transizioni precedenti era il risultato dell'assimilazione del paradigma. Il fisico che apprende la meccanica quantistica non arriva necessariamente a vedere il mondo fisico in termini di funzioni d'onda, autostati e collassi nel senso in cui vede il mondo classico in termini di traiettorie e forze — perché la comprensione fisica corrispondente non esiste in una forma condivisa e abitabile.

3.6.2 — Incommensurabilità: semantica, percettiva, cognitiva

Kuhn ha distinto tre livelli di incommensurabilità tra paradigmi: la diversità di valori epistemici (cosa conta come buona spiegazione), la diversità tassonomica (quali categorie strutturano il dominio) e la diversità percettiva (cosa il ricercatore vede guardando lo stesso esperimento). In tutte e tre le dimensioni, la transizione alla

meccanica quantistica porta l'incommensurabilità a un grado qualitativamente nuovo.

La diversità di valori epistemici è esplicita nel conflitto tra Heisenberg e Schrödinger: Heisenberg considera la *Anschaulichkeit* un valore pre-scientifico che la fisica matura deve abbandonare; Schrödinger considera la continuità e la visualizzabilità condizioni necessarie della comprensione fisica. Il disaccordo non è risolvibile all'interno di un meta-paradigma condiviso: è un disaccordo su quale tipo di comprensione sia fisicamente legittimo.

La diversità tassonomica è radicale: il concetto di «stato» nella meccanica classica è un punto nello spazio delle fasi, completamente determinato e determinante univocamente l'evoluzione futura; nella meccanica quantistica è un vettore in uno spazio di Hilbert (o più in generale, un operatore densità), e la sua relazione con i valori delle osservabili fisiche è probabilistica e non deterministica. Non si tratta di generalizzare il concetto classico di stato: si tratta di sostituirlo con qualcosa che ha la stessa etichetta ma non la stessa struttura. Il fisico che passa da un paradigma all'altro non estende la propria tassonomia: la riconfigura.

La diversità percettiva — la più rilevante per la tesi della monografia — è la forma più profonda di discontinuità. Il fisico classico esperto, guardando il grafico di una traiettoria nello spazio delle fasi, *vede* direttamente il comportamento del sistema: riconosce la struttura di un oscillatore, distingue le regioni periodiche da quelle caotiche, anticipa l'evoluzione. Questa visione è costruita, non immediata, ma è stabile e condivisa tra i fisici classici esperti. Il fisico quantistico esperto, guardando la funzione d'onda di un sistema in superposizione, non ha un analogo di questa visione: ha un oggetto matematico formalmente preciso ma senza correlato percettivo stabile. Le interpretazioni della meccanica quantistica — Copenaghen, molti mondi, Bohm — sono tentativi di costruire una visione percettiva stabile dove la struttura del formalismo non ne offre una univoca.

3.6.3 — La crisi come rivelatore della struttura cognitiva normale

C'è un aspetto dell'analisi kuhniana che la storia del Blocco III illumina in modo indiretto ma utile: le crisi scientifiche rivelano la struttura cognitiva della scienza normale *proprio perché* la mettono sotto pressione fino a renderla visibile. La crisi degli anni Venti ha reso visibile — attraverso il conflitto tra Heisenberg e Schrödinger — la struttura cognitiva della fisica classica che la pratica normale aveva reso invisibile: il fatto che il fisico classico «abitasse» il dominio attraverso un modello percettivo-causale del mondo fisico, non solo attraverso la competenza tecnica nel formalismo.

In questo senso la meccanica quantistica non è solo una rivoluzione nella fisica: è una rivoluzione nella comprensione della comprensione fisica. Mostrando che un formalismo può essere predittivamente completo e cognitivamente aperto, ha reso per la prima volta filosoficamente perspicuo il fatto che la comprensione fisica nel senso pieno — percettiva, causale, ontologica — è qualcosa di diverso dalla padronanza del formalismo. Prima della meccanica quantistica, la distinzione era oscurata dalla circostanza storica fortunata che i formalismi della fisica classica erano, almeno approssimativamente, abitabili. La crisi quantistica ha separato quello che era rimasto congiunto, rendendo analiticamente disponibile la distinzione che questa monografia articola.

---

§ 3.7 — La rottura come rivelazione: cosa la crisi mostra sulla lettura della natura

Il Blocco III ha percorso quattro momenti della storia del rapporto tra intuizione fisica e formalismo matematico: la meccanica newtoniana (intuizione precede il formalismo), la meccanica analitica (formalismo supera e guida l'intuizione), l'elettromagnetismo (analogia guida il formalismo, formalismo rivela strutture nuove), la meccanica quantistica (formalismo predittivamente completo, comprensione cognitivamente aperta). Questa sequenza non è un progresso verso la formalizzazione crescente: è una serie di trasformazioni nella struttura del rapporto cognitivo tra il fisico e il dominio fisico.

La rottura della meccanica quantistica non è solo un fatto storico: è un fatto epistemologicamente rivelatore nella struttura precisa che il conflitto Heisenberg-Schrödinger ha mostrato. Heisenberg aveva ragione nel ritenere che il dominio atomico non ammette descrizioni visualizzabili nel senso classico: il teorema di Bell, che esclude le variabili nascoste locali, e la successiva verifica sperimentale delle disuguaglianze di Bell hanno confermato che qualsiasi descrizione che salvi il realismo locale violerebbe le previsioni quantistiche. Schrödinger aveva ragione nel ritenere che la fisica deve fornire un'immagine del mondo fisico che sia abitabile — perché senza questa abitazione il fisico non può orientarsi nei casi nuovi, non può formulare congetture produttive, non può distinguere i problemi importanti dagli artefatti del formalismo.

Il paradosso della meccanica quantistica — il paradosso della completezza che il Blocco IV analizzerà nella sua forma filosofica precisa — è che ha ragione in entrambi i sensi: il dominio atomico non ammette descrizioni classicamente visualizzabili, *e* il fisico ha bisogno di abitare il dominio per fare fisica in modo produttivo. Il risultato è una forma di comprensione nuova — né la comprensione classicamente intuitiva di Newton né la rinuncia alla comprensione di Heisenberg nella sua formulazione più radicale — che le interpretazioni della meccanica quantistica cercano ciascuna di articolare in modo diverso.

Questo non significa che la meccanica quantistica sia incomprensibile in senso assoluto. Significa che la comprensione che offre è di tipo strutturalmente diverso da quella della meccanica classica: è una comprensione che opera attraverso il formalismo senza ridursi ad esso, che usa le rappresentazioni formali come strumenti di navigazione in un dominio che non si lascia visualizzare nel senso newtoniano. Il fisico che padroneggia la meccanica quantistica non ha un'immagine del mondo atomico nel senso in cui ha un'immagine del sistema solare: ha una struttura formale che sa come usare, orientata da un sistema di comprensioni parziali — l'interpretazione di Copenhagen per i calcoli pratici, la sfera di Bloch per i qubit, le

traiettorie bohmiane per certi problemi concettuali — che si integrano senza mai convergere in un'immagine unica e coerente.

La storia del rapporto tra intuizione e formalismo nella fisica è, in parte, la storia dell'espansione del dominio del mondo fisico che la lettura della natura può abitare — e la meccanica quantistica è il punto in cui questa espansione ha incontrato qualcosa che non si lascia abitare nel modo tradizionale, rivelando che la lettura della natura ha limiti strutturali che emergono dalla struttura del mondo fisico stesso, non solo dalle limitazioni cognitive dell'agente che lo legge.

Riferimenti principali: Newton (1687), *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, trad. Cohen e Whitman, California; Lagrange (1788), *Mécanique Analytique*, Desaint; Hamilton (1834-35), «On a General Method in Dynamics», *Philosophical Transactions of the Royal Society*; Maxwell (1856), «On Faraday's Lines of Force», *Transactions of the Cambridge Philosophical Society*; Maxwell (1861-62), «On Physical Lines of Force», *Philosophical Magazine*; Maxwell (1865), «A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field», *Philosophical Transactions*; Heisenberg (1925), «Über die quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», *Zeitschrift für Physik*; Born e Jordan (1925), «Zur Quantenmechanik», *Zeitschrift für Physik*; Schrödinger (1926), «Quantisierung als Eigenwertproblem I-IV», *Annalen der Physik*; Born (1926), «Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge», *Zeitschrift für Physik*; von Neumann (1932), *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer; Einstein (1905), «Zur Elektrodynamik bewegter Körper», *Annalen der Physik*; Wilson e Kogut (1974), «The Renormalization Group and the ε Expansion», *Physics Reports*; Wigner (1960), «The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences», *Communications on Pure and Applied Mathematics*; Kuhn (1962), *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago; Jammer (1966), *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*, McGraw-Hill; Mehra e Rechenberg (1982-2000), *The Historical Development of Quantum Theory*, voll. 1-6, Springer; Cassidy (1992), *Uncertainty: The Life and*

Science of Werner Heisenberg, Freeman; Moore (1989), *Schrödinger: Life and Thought*, Cambridge.

Blocco IV — Il paradosso della completezza

Le interpretazioni della meccanica quantistica come crisi filosofica della comprensione fisica

---

§ 4.1 — Le interpretazioni della meccanica quantistica: zero esperimenti risolutivi

Il fatto che la meccanica quantistica sia interpretata in modi incompatibili da scuole diverse di fisici e filosofi non è una curiosità storica in attesa di risoluzione: è una proprietà strutturale del campo che nessun progresso sperimentale futuro, per quanto accurato, potrà eliminare. Per capire perché, occorre precisare in che senso le diverse interpretazioni siano genuine alternative e in che senso siano indistinguibili empiricamente, e per farlo è necessario partire da una distinzione che la divulgazione scientifica frequentemente trascura: la distinzione tra il **formalismo** di una teoria fisica, le sue **previsioni empiriche** e la sua **interpretazione**.

Il formalismo della meccanica quantistica è l'insieme delle strutture matematiche — spazi di Hilbert, operatori hermitiani, regola di Born, equazione di Schrödinger — che il Blocco I ha esposto con precisione. Le previsioni empiriche sono i numeri che il formalismo produce: le distribuzioni di probabilità sugli outcomes degli esperimenti, che gli esperimenti poi verificano o falsificano. L'interpretazione è la risposta alla domanda: *cosa descrive il formalismo?* Quale struttura del mondo fisico corrisponde allo stato quantistico $|\psi\rangle$, all'operatore $\hat{A}$, al collasso della funzione d'onda? Sono queste domande — non empiriche nel senso stretto, ma non per questo prive di contenuto — che le diverse interpretazioni affrontano in modo incompatibile.

Due teorie fisiche sono **empiricamente equivalenti** se per ogni esperimento concepibile producono le stesse distribuzioni di probabilità sui risultati possibili. Le principali interpretazioni della meccanica quantistica sono empiricamente equivalenti in questo senso preciso: l'interpretazione di Copenaghen, la meccanica dei molti mondi di Everett, la meccanica di Bohm-de Broglie, l'interpretazione relazionale di Rovelli, le teorie del collasso oggettivo come GRW, e l'interpretazione information-theoretic di Zeilinger producono tutte le stesse previsioni per qualsiasi sequenza di esperimenti realizzabili. Non esiste alcun esperimento — attuale o futuro, con qualsiasi livello di precisione — che possa distinguerle, perché differiscono non su ciò che prevedono ma su ciò che dicono il mondo sia.

La precisazione tecnica merita attenzione. Le teorie del collasso oggettivo — GRW e varianti, di cui si tratta nel § 4.5 — modificano formalmente il formalismo aggiungendo un termine stocastico non lineare all'equazione di Schrödinger, e in linea di principio producono previsioni leggermente diverse dalla meccanica quantistica standard per sistemi mesoscopici di massa sufficiente. In questo senso, GRW non è strettamente empiricamente equivalente alle altre interpretazioni, ma è empiricamente equivalente nei regimi attualmente accessibili alla sperimentazione. Esperimenti in corso con interferometria di molecole di massa crescente stanno cercando queste deviazioni: se trovate, escluderebbero GRW con i parametri standard, ma non le altre interpretazioni. L'equivalenza empirica tra Copenaghen, molti mondi, Bohm e interpretazione relazionale è invece, per quanto è noto, esatta.

Questo fatto — che il Blocco I ha mostrato come conseguenza della struttura formale e che il Blocco III ha situato storicamente — è il punto di partenza del Blocco IV, e richiede un'analisi filosofica che nessuna delle discipline dei blocchi precedenti è attrezzata a fare da sola. La questione non è empirica: è concettuale. Le interpretazioni differiscono su domande come: la funzione d'onda descrive la realtà fisica o la conoscenza dell'agente? Il collasso è un processo fisico reale o una transizione epistemica? La non-località quantistica viola la

relatività speciale? Le grandezze fisiche hanno valori determinati prima della misura? Queste domande richiedono analisi filosofica — chiarificazione dei concetti, valutazione della coerenza interna delle risposte, esame delle presupposizioni implicate — non esperimenti.

Vale la pena soffermarsi su questa conclusione, perché è controintuitiva per chi è abituato a pensare la fisica come una disciplina empirica per eccellenza. La meccanica quantistica è la teoria più accurata mai costruita: le previsioni dell'elettrodinamica quantistica concordano con le misurazioni al livello di 10^{-12}, dodici cifre decimali. Eppure il dibattito su cosa essa descriva non è risolto, e non può essere risolto dall'accuratezza delle previsioni, perché tutte le interpretazioni producono le stesse previsioni. Questo non è un fallimento della fisica: è una rivelazione della struttura del problema interpretativo. La fisica quantistica ha prodotto un formalismo così potente e così raffinato da separare completamente la capacità predittiva dalla comprensione ontologica — e questa separazione è ciò che la monografia chiama il paradosso della completezza.

Il Blocco IV percorre le cinque interpretazioni principali con sufficiente precisione da mostrarne le strutture concettuali e le difficoltà proprie, prima di estrarne le implicazioni per la tesi della monografia.

---

§ 4.2 — L'interpretazione di Copenaghen: il prezzo del silenzio

L'interpretazione di Copenaghen non è una singola posizione coerente: è una famiglia di posizioni che condividono alcune idee di fondo — la centralità della misura, la rinuncia alla descrizione della realtà indipendente dall'osservatore, la complementarità come principio epistemico — ma che differiscono sui dettagli in modi che Bohr, Heisenberg e Born non hanno mai completamente risolto. La distinzione tra la posizione di Bohr e quella di Heisenberg è qui rilevante: Heisenberg tendeva a interpretare il collasso come un aggiornamento della conoscenza soggettiva dell'agente — una

posizione epistemica pura — mentre Bohr sviluppò una posizione più sottile in cui il problema non era la conoscenza dell'agente ma la struttura stessa del linguaggio fisico applicabile ai fenomeni quantistici. La ricostruzione che segue privilegia la posizione di Bohr, che è la più elaborata filosoficamente e la più influente storicamente.

Il nucleo della posizione di Bohr è il **principio di complementarità**: la descrizione completa di un fenomeno quantistico richiede concetti mutuamente esclusivi — onda e particella, posizione e momento, spin in direzioni diverse — nessuno dei quali è applicabile simultaneamente, ma ciascuno dei quali è indispensabile per una descrizione completa. Questa esclusività non è un'imperfezione della teoria: è una proprietà fondamentale del dominio quantistico, che riflette il fatto che le condizioni sperimentali necessarie per misurare concetti complementari sono fisicamente incompatibili. Per misurare la posizione di un elettrone con alta precisione occorre impiegarvi fotoni di lunghezza d'onda molto breve — fotoni di alta energia — che perturbano il momento in modo tanto maggiore quanto più piccola è la lunghezza d'onda. Questa non è una limitazione tecnica: è una conseguenza della relazione di commutazione $\left[\hat{x}, \hat{p}\right] = i\hbar$, che è una struttura matematica del formalismo, non un artefatto della tecnica sperimentale.

La posizione di Bohr implica una conseguenza epistemica radicale: la fisica quantistica non può descrivere la realtà atomica come è indipendentemente dall'osservazione. Può descrivere solo le relazioni tra i fenomeni — gli outcomes delle misure — e le condizioni sperimentali che li producono. La funzione d'onda non è una rappresentazione dell'atomo: è una rappresentazione del nostro stato di conoscenza dell'atomo, e il collasso al momento della misura non è un evento fisico ma un aggiornamento epistemico, analogo all'aggiornamento bayesiano di una distribuzione di probabilità alla luce di nuovi dati. Quando si ottiene il risultato «spin-up» nella misura dello spin di un elettrone, la funzione d'onda non collassa fisicamente: si aggiorna la rappresentazione della conoscenza dell'elettrone alla luce del risultato della misura, e si usa questa

rappresentazione aggiornata per calcolare le probabilità delle prossime misure.

Questa posizione è coerente e ha una logica interna precisa. Ma paga un prezzo filosofico che Bohr riconosce esplicitamente e che Einstein non accettò mai: rinuncia alla descrizione della realtà fisica indipendente dall'osservatore. Nel dibattito con Einstein al quinto Congresso Solvay del 1927 — il più importante confronto filosofico nella storia della fisica moderna, uno di quei momenti in cui il pensiero fisico e il pensiero filosofico si toccano con sufficiente precisione da rendere impossibile tenerli separati — Bohr sostiene che la domanda su cosa accada all'atomo quando non viene misurato è semplicemente priva di significato fisico: la fisica descrive fenomeni, non realtà noumeniche. Einstein ribatte che una teoria fisica che non descrive la realtà fisica è, per definizione, incompleta — e che l'incompletezza della meccanica quantistica deve essere colmata con variabili nascoste che rendano la teoria deterministica e locale. Il celebre grido «*Gott würfelt nicht!*» — *Dio non gioca a dadi!* — esprime non solo un'intuizione estetica ma un programma di ricerca: trovare il livello di descrizione in cui il determinismo è ripristinato.

Il paradosso EPR di Einstein, Podolsky e Rosen (1935) porta questo disaccordo alla sua forma più acuta e tecnicamente precisa. Si considerino due particelle in uno stato entangled di spin — lo stato di singoletto

$$\left|\Psi^{-}\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|\uparrow\right\rangle_A\left|\downarrow\right\rangle_B - \left|\downarrow\right\rangle_A\left|\uparrow\right\rangle_B\right)$$

— e si misuri lo spin della particella A lungo la direzione $\hat{z}$: il risultato è, con probabilità $\frac{1}{2}$, spin-up o spin-down. Immediatamente dopo la misura su A, lo stato della particella B — che può essere a qualsiasi distanza da A — è determinato con certezza: se A è spin-up, B è necessariamente spin-down, e viceversa. Come può la misura su A determinare istantaneamente lo stato di B a distanza arbitraria?

EPR propone due alternative. Primo: esiste un'azione a distanza non locale, che viola il principio di separabilità relativistica — la tesi che eventi in regioni causalmente disconnesse non si influenzino.

Secondo: gli spin di entrambe le particelle erano già determinati prima della misura, in modo non descritto dalla meccanica quantistica — la meccanica quantistica è *incompleta*, e le variabili nascoste che determinano i valori preesistenti dello spin sono ciò che manca. EPR definisce «elemento di realtà» una grandezza fisica il cui valore può essere previsto con certezza senza perturbazione del sistema, e argomenta che lo spin di B, determinabile con certezza dopo la misura su A senza alcuna interazione con B, deve essere un elemento di realtà preesistente. La meccanica quantistica non descrive questi elementi di realtà: dunque è incompleta.

Bohr risponde — in modo che molti hanno trovato insoddisfacente, e che richiede una lettura attenta per essere difeso — che le due particelle in stato entangled non sono sistemi fisici indipendenti, e che la domanda sullo stato di B prima della misura su A è priva di significato fisico: le condizioni sperimentali di misurazione di A definiscono il contesto fisico in cui anche B viene descritto, perché i due sistemi formano un'unica unità fisica fino al momento della misura. L'insoddisfazione della risposta di Bohr è reale: non spiega il meccanismo fisico attraverso cui la correlazione si mantiene, ma dissolve la domanda sul meccanismo dichiarandola mal posta.

Il teorema di Bell, come il Blocco I ha mostrato, chiude questa disputa in modo parzialmente definitivo: le variabili nascoste *locali* sono escluse sperimentalmente dalla violazione delle disuguaglianze di Bell, e la violazione è stata verificata da Clauser (1972), Aspect (1982), e infine Zeilinger e collaboratori (2015) in forme progressivamente più rigorose che eliminano le principali scappatoie sperimentali (*loopholes*). La disuguaglianza di Clauser-Horne-Shimony-Holt

$$B = |\langle A_1 B_1 \rangle + \langle A_1 B_2 \rangle + \langle A_2 B_1 \rangle - \langle A_2 B_2 \rangle| \leq 2$$

è violata dalla meccanica quantistica per le coppie entangled, con il valore $2\sqrt{2}$ nel caso ottimale — il limite di Tsirelson — e questa violazione è misurata sperimentalmente con deviazione dal limite classico superiore a centinaia di deviazioni standard. Ma escludere le variabili nascoste locali non significa accettare Copenaghen: significa

soltanto che ogni interpretazione deve rinunciare a uno dei due — localismo o realismo — o ad entrambi. Apertura che le interpretazioni successive sfruttano in modi diversi.

Il **prezzo del silenzio** di Copenaghen è questo: produce una pratica di calcolo completamente efficace — «*shut up and calculate*», nella formula apocrifa attribuita a Dirac — ma rinuncia a offrire un modello fisico del mondo quantistico. Per la tesi della monografia, questa rinuncia è precisamente il paradosso della completezza in azione: il formalismo funziona perfettamente, la comprensione è sospesa per principio metodologico.

---

§ 4.3 — La meccanica dei molti mondi: il formalismo preso alla lettera

4.3.1 — La proposta di Everett: zero collasso, tutto reale

L'interpretazione di Everett (1957) — nota come meccanica dei molti mondi, sebbene Everett nella tesi originale (*Relative State Formulation of Quantum Mechanics*, Princeton, 1957) non usasse questo termine, preferendo parlare di «formulazione dello stato relativo» — parte da una constatazione formale di straordinaria semplicità: l'equazione di Schrödinger vale sempre, descrive tutto, e non c'è nessuna ragione matematica interna al formalismo per introdurre il collasso come processo separato. Se si prende questa affermazione alla lettera, senza introdurre nessun collasso come postulato aggiuntivo, la meccanica quantistica è completa come teoria della realtà fisica e il formalismo descrive il mondo intero — inclusi gli apparati di misura, gli osservatori e le loro percezioni.

La genesi della teoria è rilevante per capirne la struttura. Everett era un dottorando in fisica teorica presso Princeton, lavorava sotto la supervisione di John Archibald Wheeler, ed era frustrato dall'incoerenza logica dell'interpretazione di Copenaghen nel trattare il confine tra sistema quantistico e apparato classico. Il problema che vedeva era preciso: la fisica quantistica descrive il sistema da misurare, ma tratta l'apparato e l'osservatore come sistemi classici —

un'asimmetria che non ha giustificazione formale nel formalismo. Se la meccanica quantistica è una teoria universale, deve valere anche per gli apparati di misura e per gli osservatori. Ma se vale per l'osservatore, il collasso della funzione d'onda non è un processo fisico descritto dalla teoria: è un'aggiunta esterna, un «postulato di riduzione» che non si deriva dall'equazione di Schrödinger. Everett propose di eliminarlo.

La conseguenza è radicale. Quando si misura lo spin della particella in uno stato $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$, l'evoluzione unitaria del sistema composito particella-apparato-osservatore — obbedendo integralmente all'equazione di Schrödinger — produce lo stato entangled

$$\left|\Psi\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|\uparrow\right\rangle|registrato\uparrow\rangle|vede\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle|registrato\downarrow\rangle|vede\downarrow\rangle\right).$$

Entrambi i termini di questa sovrapposizione sono fisicamente reali: entrambi i «rami» dell'universo esistono, e in ciascuno un osservatore vede un risultato definito. Non c'è collasso — non è necessario — e non c'è alcuna scelta esterna di quale ramo si realizzi: tutti i rami si realizzano. L'osservatore nel ramo spin-up ha osservato «spin-up» e non è mai consapevole dell'osservatore nel ramo spin-down, e viceversa, non perché uno dei due non esista, ma perché la decoerenza quantistica rende i rami praticamente incapaci di interferire tra di loro.

4.3.2 — La struttura formale del branching: decoerenza e basi preferenziali

La nozione di **ramo** (*branch*) nella meccanica dei molti mondi non è primitiva del formalismo: emerge dalla decoerenza. Questo è il contributo tecnico cruciale che trasforma la proposta everettiana da metafora suggestiva a teoria fisica con struttura precisa.

Quando un sistema S interagisce con un ambiente E composto da un numero enorme di gradi di libertà — fotoni, molecole d'aria, fononi, il campo elettromagnetico di fondo — lo stato del sistema composito diventa

$$\left|\Psi_{SE}\right\rangle = \sum_k c_k \left|s_k\right\rangle \left|e_k\right\rangle,$$

dove $|e_k\rangle$ sono stati dell'ambiente entangled con gli stati $|s_k\rangle$ del sistema. Tracciando sull'ambiente, la matrice densità ridotta del sistema diventa

$$\hat{\rho}_S = tr_E\left(\left|\Psi_{SE}\right\rangle\left\langle\Psi_{SE}\right|\right) = \sum_{j,k} c_j c_k^* \left|s_j\right\rangle\left\langle s_k\right| \langle e_k|e_j\rangle.$$

Se gli stati dell'ambiente sono sufficientemente distinti — $\langle e_j|e_k\rangle \approx \delta_{jk}$ — i termini fuori diagonale scompaiono su scale temporali brevissime per sistemi macroscopici ($\tau_{dec} \sim 10^{-20}$ s per oggetti di massa $\sim$ 1 g), e la matrice densità ridotta diventa quasi-diagonale:

$$\hat{\rho}_S \approx \sum_k \left|c_k\right|^2 \left|s_k\right\rangle\left\langle s_k\right|.$$

Questo è il **fenomeno della decoerenza**: l'entanglement con l'ambiente sopprime le interferenze tra stati macroscopicamente distinti, rendendo il sistema in pratica indistinguibile da un miscuglio statistico. Ma l'interpretazione everettiana è precisa: non si tratta di un miscuglio reale — lo stato globale $|\Psi_{SE}\rangle$ è ancora un puro, e tutti i rami sono fisicamente presenti — ma di un miscuglio *locale*, che emerge dalla prospettiva di qualsiasi osservatore confinato a uno dei rami.

Il **problema della base preferenziale** (*preferred basis problem*) è la difficoltà tecnica più seria che l'interpretazione deve affrontare. Il vettore di stato dell'universo $|\Psi\rangle$ può essere decomposto in infiniti modi come somma di stati di prodotto: non c'è nessuna ragione matematica a priori per privilegiare la decomposizione in termini di stati di posizione macroscopicamente definiti rispetto alla decomposizione in termini di stati di momento, o di qualsiasi altra base. Eppure solo alcune basi danno rami che corrispondono a osservatori con esperienze definite — rami in cui il gatto è vivo *o* morto, non in una sovrapposizione di vita e morte.

La risposta moderna, elaborata da Wojciech Zurek attraverso la nozione di **quantum Darwinism** e **einselection** (environment-induced superselection), è che la decoerenza seleziona automaticamente una base preferenziale — la **pointer basis** o base dei puntatori — che corrisponde agli stati che si propagano ridondantemente nell'ambiente e diventano accessibili a osservatori distinti. In termini formali, la pointer basis è la base che minimizza la produzione di entanglement con l'ambiente: sono gli stati $|s_k\rangle$ tali che, per $t > 0$, l'evoluzione congiunta soddisfa

$$\hat{U}(t)\left|s_k\right\rangle\left|e_0\right\rangle = \left|s_k\right\rangle\left|e_k(t)\right\rangle$$

(il sistema rimane nel suo stato, e solo l'ambiente si modifica). Questi stati sono selezionati dal processo di decoerenza in modo «darwiniano»: sopravvivono le strutture che si propagano nell'ambiente e diventano registrabili da osservatori multipli. La selezione della base classica — posizione, impulso, energia per i sistemi con hamiltoniane locali — è una conseguenza della fisica dell'interazione sistema-ambiente, non un'assunzione aggiuntiva.

4.3.3 — Il problema della probabilità: la derivazione decision-teorica di Deutsch-Wallace

Il **problema della probabilità** è il secondo ostacolo tecnico fondamentale, e in un certo senso il più sottile. In una teoria in cui tutti gli outcomes si realizzano in rami distinti, cosa significa affermare che la probabilità di ottenere il risultato a_k è $\left|c_k\right|^2$? Se tutti i risultati si realizzano con certezza (in qualche ramo), come può avere senso attribuire probabilità a ciascuno?

La risposta standard — nel contesto della meccanica dei molti mondi — è l'argomento decision-teorico sviluppato da David Deutsch (1999) e sistematizzato da David Wallace (2007, 2012). L'argomento mira a derivare la regola di Born $p\left(a_k\right) = \left|c_k\right|^2$ da principi di razionalità, senza assumerla come postulato.

Il setup è il seguente. Un agente razionale si trova prima di una misurazione quantistica: sa che dopo la misura esistono rami in cui

ha ottenuto diversi risultati. L'agente deve decidere come scommettere sui risultati della misura — deve assegnare valori di utilità alle diverse possibili esperienze post-misura. Deutsch mostra che, sotto assunzioni di razionalità plausibili (transitività delle preferenze, principio di equivalenza degli stati fisicamente equivalenti, invarianza sotto certi scambi di permutazione sui rami), l'unica struttura di scommessa razionale è quella che assegna ai diversi outcomes probabilità proporzionali a $|c_k|^2$. La regola di Born è derivabile come unica struttura di scommessa razionale nella meccanica dei molti mondi.

Wallace ha poi esteso e raffinato l'argomento, rispondendo alle obiezioni di David Albert e di Huw Price, e mostrando che la derivazione vale anche per osservatori irrazionali che si trovano soggettivamente in uno dei rami, purché la struttura fisica del branching sia quella everettiana. La derivazione è formalmente precisa: le «assunzioni di razionalità» sono teoremi sulla struttura degli stati di Hilbert e sulla fisica della decoerenza, non presupposizioni esterne.

La controversia non è chiusa. Albert ha argomentato che la derivazione decision-teorica presuppone implicitamente la regola di Born, perché usa concetti — come l'«ampiezza» di un ramo — che la incorporano strutturalmente. Adrian Kent ha mostrato che esistono strategie di scommessa alternative che, in un universo everettiano, non producono svantaggi evidenti per chi le adotta, rendendo non univoca la derivazione. Il dibattito tecnico è aperto, ma la posizione di Wallace rappresenta il tentativo più sofisticato di fondare la probabilità nella meccanica dei molti mondi senza circolarità.

4.3.4 — Le implicazioni cosmologiche e il prezzo ontologico

La meccanica dei molti mondi è la posizione preferita da una frazione significativa dei cosmologi quantistici, per una ragione precisa: è l'unica interpretazione che si applica naturalmente alla cosmologia quantistica, la disciplina che tenta di descrivere l'universo nel suo complesso come sistema quantistico. In Copenaghen, la misura richiede un apparato classico esterno al

sistema: ma se il sistema è l'intero universo, non c'è nulla di esterno. La meccanica dei molti mondi non ha questo problema: la funzione d'onda dell'universo $|\Psi_{univ}\rangle$ evolve unitariamente, senza bisogno di nessun osservatore esterno o di nessun collasso.

Stephen Hawking e James Hartle hanno sviluppato la **proposta no-boundary** per la funzione d'onda dell'universo, che descrive la distribuzione di probabilità sulle possibili geometrie dell'universo all'inizio del tempo cosmico. In questo contesto, le «misure» che selezionano le storie cosmologiche che osserviamo non hanno un senso bohriano — non c'è nessun laboratorio classico in cui si misura l'universo — ma hanno un senso everettiano: sono i rami della funzione d'onda universale in cui esistono osservatori come noi.

Il prezzo ontologico è massimale. Per N misure binarie effettuate in qualsiasi punto del cosmo, esistono 2^N rami dell'universo — e le misure vengono effettuate ovunque e continuamente. In pratica, il numero di rami cresce come $e^{entropia\ dell'universo}$, che è un numero enormemente più grande del numero di atomi osservabile. La proliferazione ontologica è considerata da Everett e dai suoi successori il prezzo dell'onestà formale — e da alcuni critici (tra cui Steven Weinberg, in una fase del suo pensiero) il rifiuto dell'occamismo come principio metodologico.

Per la tesi della monografia, la meccanica dei molti mondi è il caso in cui la comprensione fisica è separata dall'intuizione nella forma più radicale. Abitare cognitivamente un'ontologia in cui ogni atto di misura ramifica l'universo — in cui esistono copie di se stessi che hanno ottenuto tutti i possibili risultati di tutte le possibili misure effettuate in tutta la storia dell'universo — è possibile in senso formale: il formalismo è coerente, e Wallace ha mostrato che un agente razionale in tale universo agisce come se la regola di Born valesse. Ma non è possibile nel senso della **lettura della natura** come la monografia la intende: non c'è nessun modello fisico della propria esperienza che si possa costruire e abitare nella proliferazione dei rami. Il fisico everettiano comprende perfettamente il formalismo e sa

di non avere accesso a nessuna immagine del mondo che descrive: la comprensione è puramente formale, la lettura della natura è sospesa.

---

§ 4.4 — La meccanica di Bohm: realismo al prezzo della non-località

4.4.1 — Il programma di Einstein e la risposta di Bohm

La meccanica di de Broglie-Bohm è la risposta diretta, tecnicamente rigorosa, al programma di Einstein: costruire una teoria deterministica e realista che riproduca esattamente tutte le previsioni della meccanica quantistica standard, senza collasso, senza molteplici rami, con un'ontologia chiara in cui ogni sistema fisico ha proprietà definite in ogni istante. Il prezzo — che il teorema di Bell ha dimostrato essere inevitabile per qualsiasi completamento realista della meccanica quantistica che voglia mantenere la coerenza — è la non-località ontologica.

La storia del programma è intrecciata con la storia del dibattito EPR. Einstein, Podolsky e Rosen (1935) avevano argomentato che la meccanica quantistica è incompleta: un sistema fisico reale ha proprietà definite prima della misura, e la meccanica quantistica non le descrive. La risposta di Bohr — che queste proprietà «definite prima della misura» non hanno significato fisico — non soddisfece Einstein, che rimase convinto per tutta la vita che le variabili nascoste esistessero. De Broglie aveva già proposto nel 1927 una teoria a onde pilota, ma l'aveva abbandonata dopo le critiche ricevute alla conferenza Solvay dello stesso anno. Bohm la riscopre e la sviluppa rigorosamente nel 1952, in due articoli in *Physical Review*, senza essere a conoscenza del lavoro di de Broglie.

L'articolo di Bohm del 1952 è un esempio di come si costruisce una teoria fisica alternativa: non modifica i dati sperimentali, non cambia le previsioni, ma riorganizza completamente l'ontologia. Bohm introduce esplicitamente le variabili nascoste che Einstein cercava — le posizioni definite delle particelle — e dimostra che, con la dinamica appropriata (l'equazione guida), queste posizioni

producono statisticamente le previsioni della meccanica quantistica. Il risultato confutava la prova di impossibilità di von Neumann, che aveva convinto la maggior parte dei fisici che le teorie a variabili nascoste fossero matematicamente escluse: la prova di von Neumann era corretta, ma le sue assunzioni escludevano solo le variabili nascoste con determinate proprietà di non-contestualità, non le variabili nascoste in generale.

4.4.2 — La struttura matematica: equazione guida, potenziale quantistico, equivarianza

La meccanica di Bohm aggiunge alla funzione d'onda $\psi(x,t)$ — che soddisfa l'equazione di Schrödinger ordinaria — una particella reale con posizione definita $x(t)$ che si muove secondo l'**equazione guida**:

$$\frac{dx}{dt} = \frac{\hbar}{m}\, Im\left(\frac{\nabla\psi}{\psi}\right)\Big|_{x=x(t)} = \frac{J(x,t)}{|\psi(x,t)|^2},$$

dove $J = \frac{\hbar}{m}\, Im\left(\psi^{*}\nabla\psi\right)$ è la corrente di probabilità quantistica. La traiettoria della particella è determinata dalla sua posizione iniziale $x(0)$ e dalla funzione d'onda, che agisce come un **campo guida** o **onda pilota** che dirige il moto ma non trasporta energia o momento nel senso classico.

Scrivendo $\psi = R\, e^{iS/\hbar}$, con $R = |\psi|$ e $S = \hbar arg\psi$, l'equazione di guida diventa $dx/dt = \nabla S/m$, e l'equazione di Schrödinger si separa in due equazioni reali: l'equazione di continuità per R^2

$$\frac{\partial R^2}{\partial t} + \nabla\cdot\left(R^2\nabla S/m\right) = 0$$

e l'equazione di Hamilton-Jacobi modificata

$$\frac{\partial S}{\partial t} + \frac{(\nabla S)^2}{2m} + V + Q = 0,$$

dove il **potenziale quantistico** è

$$Q(x,t) = -\frac{\hbar^2}{2m}\frac{\nabla^2 R}{R}.$$

Il potenziale quantistico è l'elemento ontologicamente più interessante e più problematico della meccanica di Bohm. Non ha analogo nella meccanica hamiltoniana classica: dipende dalla forma globale della funzione d'onda — dalla distribuzione di R nello spazio

— e non dall'intensità locale del campo. Due particelle possono avere lo stesso V ma diversi Q se le loro funzioni d'onda hanno forme diverse. Per un sistema di due particelle entangled, il potenziale quantistico è definito sullo spazio di configurazione a sei dimensioni e non si fattorizza: la traiettoria della particella A dipende dalla posizione istantanea della particella B, ovunque essa si trovi nello spazio.

La **proprietà di equivarianza** è il teorema chiave che garantisce la coerenza statistica della meccanica di Bohm. Se la distribuzione iniziale delle posizioni è $|\psi(x,0)|^2$ — la distribuzione di equilibrio quantistico — allora per l'equazione di continuità questa distribuzione si conserva nel tempo:

$$\frac{\partial|\psi|^2}{\partial t} + \nabla\cdot\left(|\psi|^2 dx/dt\right) = 0.$$

Questo è identico all'equazione di continuità per $|\psi|^2$ derivata dall'equazione di Schrödinger. Quindi, se la distribuzione iniziale è $|\psi_0|^2$, rimane $|\psi_t|^2$ per tutti i tempi: la distribuzione di equilibrio quantistico è equivariante rispetto alla dinamica. Poiché la distribuzione delle posizioni iniziali è — per ipotesi di equilibrio — $|\psi_0|^2$, le previsioni statistiche della meccanica di Bohm coincidono con quelle della meccanica quantistica standard per qualsiasi osservabile.

La questione del perché le posizioni iniziali debbano essere distribuite secondo $|\psi_0|^2$ — e non secondo qualche altra distribuzione — è analoga alla questione del perché in meccanica statistica classica le distribuzioni iniziali debbano essere quelle di equilibrio di Gibbs. Dürr, Goldstein e Zanghì (1992) hanno sviluppato un argomento probabilistico rigoroso che giustifica la distribuzione di equilibrio quantistico come la distribuzione tipica per traiettorie bohmiane in universi grandi — un argomento che usa il teorema di equitipicalità (*typicality theorem*) anziché una probabilità a priori.

4.4.3 — Non-località e il teorema di Bell

Il teorema di Bell (1964) è nato direttamente dal tentativo di comprendere se la meccanica di Bohm fosse l'unica possibile teoria a variabili nascoste, o se esistessero variabili nascoste locali. Bell stesso era un estimatore della meccanica di Bohm e voleva capirne la struttura generale. La risposta che trovò cambiò la fisica fondamentale: le teorie a variabili nascoste *locali* sono incompatibili con le previsioni della meccanica quantistica, sperimentalmente verificate. Le teorie a variabili nascoste *non locali* — come la meccanica di Bohm — sono invece compatibili.

La non-località della meccanica di Bohm è ontologica, non epistemica: la traiettoria di una particella dipende istantaneamente dalla posizione dell'altra particella entangled, attraverso il potenziale quantistico definito sullo spazio di configurazione globale. In un esperimento EPR in cui le due particelle sono separate da una distanza d, la misura su A modifica istantaneamente il potenziale quantistico per B — una correlazione che avviene a velocità superluminale nel senso ontologico.

Perché questo non viola la relatività speciale? Perché l'informazione non viaggia a velocità superluminale: la non-località è reale ma non segnalante. Un osservatore che misura B non può sapere se A è stata misurata o meno — poiché le previsioni statistiche per B sono le stesse indipendentemente da ciò che è stato fatto su A. La correlazione è non locale e instantanea, ma non trasmette informazione segnalante. Formalmente, $tr_B\left(\hat{\rho}_{AB}|_{misura\ su\ A}\right) = tr_B\left(\hat{\rho}_{AB}|_{no\ misura\ su\ A}\right)$ — il marginalizzare su B è indipendente da ciò che si fa su A.

Bell era preciso su questa distinzione. In una lettera del 1985, scrive: «si può dimostrare che i processi quantistici non possono essere usati per segnalazione superluminale, anche nella teoria di Bohm. Ma la non-segnalazione non implica la non-lokalità. Il mondo descrittivo di Bohm è non-locale nel senso ontologico, non epistemico». Bell concludeva che la non-località è un prezzo inevitabile per qualsiasi teoria che voglia essere realista e completa — non un difetto specifico

della meccanica di Bohm, ma una proprietà necessaria del mondo fisico quantistico.

4.4.4 — Le difficoltà relativistiche e la questione delle estensioni

La principale difficoltà tecnica della meccanica di Bohm è l'estensione al regime relativistico e alla teoria quantistica dei campi. La meccanica di Bohm non-relativistica definisce l'equazione guida in termini del gradiente della funzione d'onda nello spazio di configurazione, e richiede un concetto privilegiato di simultaneità — necessario per definire l'istante in cui la posizione di A influenza la traiettoria di B. Nella relatività speciale non esiste un concetto assoluto di simultaneità: eventi simultanei in un riferimento non sono simultanei in un altro. Come si definisce l'istante in cui la non-località si manifesta in un framework relativistico?

Diverse estensioni relativistiche della meccanica di Bohm sono state proposte: Dürr, Goldstein, Münch-Berndl e Zanghì (1999) hanno sviluppato un framework basato su una struttura temporale privilegiata — una foliation preferenziale dello spaziotempo — che mantiene la struttura bohmiana a costo di introdurre una violazione esplicita della covarianza di Lorentz a livello ontologico (sebbene non a livello delle previsioni sperimentali). Bell aveva già notato questa tensione: la meccanica di Bohm richiede un riferimento privilegiato, e sebbene le previsioni siano Lorentz-invarianti, l'ontologia non lo è.

Nel contesto della teoria quantistica dei campi, le difficoltà sono ulteriori. Dürr, Goldstein, Tumulka e Zanghì (2004) hanno sviluppato una versione bohmiana della QFT scalare, ma l'estensione a teorie di gauge — come l'elettrodinamica quantistica, con la sua struttura gauge-invariante — è tecnicamente più complicata. La principale difficoltà è che i bosoni relativistici (fotoni, bosoni W e Z, gluoni) non hanno posizioni definite nel senso della meccanica di Bohm non-relativistica, e il ruolo del «campo guida» deve essere reinterpretato.

Queste difficoltà non escludono che la meccanica di Bohm sia una teoria fisica coerente: lo è, e Holland (1993) ne ha sviluppato l'applicazione a numerosi sistemi fisici, mostrando che le traiettorie

bohmiane producono gli stessi risultati della meccanica quantistica standard per tutti i sistemi analizzati. Ma mostrano che l'estensione relativistica richiede scelte ontologiche aggiuntive — tra cui la scelta di una foliation preferenziale — che la meccanica di Bohm non-relativistica non richiede.

4.4.5 — Comprensione fisica bohmiana: una lettura della natura problematica

La ragione per cui la meccanica di Bohm non ha convinto la maggioranza dei fisici non è tecnica — il formalismo è rigorosamente coerente — ma cognitiva ed epistemologica: il tipo di comprensione fisica che offre è diverso da quello che la lettura della natura classica prometteva.

Da un lato, la meccanica di Bohm offre esattamente ciò che sembrava perduto nella meccanica quantistica: una narrativa causale e deterministica per ogni singolo evento. Per un esperimento di doppia fenditura, la traiettoria bohmiana della particella passa attraverso una delle due fenditure, e il pattern di interferenza sull'altro lato emerge dalla struttura del campo guida — che si propaga attraverso entrambe le fenditure e guida la particella verso le regioni di interferenza costruttiva. Si può «visualizzare» il passaggio della particella, anche se non si può sapere attraverso quale fenditura passerà senza modificare il campo guida.

Dall'altro lato, il campo guida in uno spazio di configurazione $3N$ -dimensionale non è visualizzabile nel senso della lettura della natura classica. Abitare cognitivamente un'ontologia in cui esiste un campo fisico nello spazio di configurazione $3N$-dimensionale — uno spazio che per $N \sim 10^{23}$ (l'ordine di grandezza degli atomi in un grammo di materia) ha dimensioni dell'ordine di 3×10^{23} — è possibile formalmente ma non cognitivamente nel senso del Blocco II. Nessun fisico ha un'intuizione spaziale degli spazi di configurazione ad alta dimensione come ce l'ha per lo spazio tridimensionale.

La meccanica di Bohm offre quindi una lettura della natura particolare: deterministica, causale, realista, ma abitata in uno spazio

fisico che non è quello dell'esperienza sensoriale. È una comprensione formalmente completa e concettualmente più ricca di Copenaghen e dei molti mondi in certi aspetti — perché fornisce traiettorie definite — ma radicalmente non-classica nel senso dello spazio fisico in cui queste traiettorie sono definite. Il prezzo della non-località non è solo tecnico: è cognitivo.

---

§ 4.5 — Le teorie del collasso oggettivo: modificare il formalismo per salvare la comprensione

4.5.1 — La strategia: rendere il collasso un processo fisico

Le teorie del collasso oggettivo condividono una strategia filosofica precisa che le distingue da tutte le altre interpretazioni: invece di interpretare il collasso come un postulato epistemico (Copenaghen), come una ramificazione ontologica (molti mondi), o come un effetto guidato da variabili nascoste (Bohm), rendono il collasso un processo fisico reale, descrivibile da equazioni modificate dell'evoluzione quantistica. Il collasso non è un'aggiunta alla meccanica quantistica: è incorporato nella dinamica fondamentale, che diventa una generalizzazione stocastica e non lineare dell'equazione di Schrödinger.

Questa è la scelta filosoficamente più netta tra tutte le interpretazioni. Se il problema della misura emerge dall'incompatibilità tra evoluzione unitaria e collasso, la soluzione più diretta è modificare l'evoluzione unitaria in modo da includervi il collasso. Il prezzo è abbandonare l'eleganza formale della meccanica quantistica standard — che non ha parametri liberi nel settore interpretativo — e introdurre nuovi parametri fisici che devono essere determinati sperimentalmente. Ma il guadagno è una teoria in cui il collasso è un fatto fisico, non un problema filosofico.

4.5.2 — Il modello GRW: localizzazioni spontanee e il loro tasso

Il modello GRW (Ghirardi, Rimini, Weber, 1986) è la formulazione originale e più semplice. L'equazione dinamica è modificata aggiungendo all'evoluzione hamiltoniana un processo stocastico di

localizzazione spontanea: con frequenza λ per nucleone, la funzione d'onda di una particella viene moltiplicata per una gaussiana centrata su una posizione x_0 scelta con distribuzione $\left|\psi\left(x_0\right)\right|^2$:

$$\psi(x) \to \frac{J_{x_0}\psi(x)}{\|J_{x_0}\psi\|}, \quad J_{x_0}(x) = \left(\frac{1}{2\pi\sigma^2}\right)^{3/4} exp\left(-\frac{\left(x-x_0\right)^2}{4\sigma^2}\right).$$

I parametri liberi del modello sono: - **Tasso di localizzazione**: $\lambda \approx 10^{-16}$ s^{-1} per nucleone - **Larghezza di localizzazione**: $\sigma \approx 10^{-7}$ m

Questi valori sono scelti in modo che: 1. Per sistemi microscopici ($N = 1$), le localizzazioni spontanee siano rarissime: una ogni 10^{16} secondi, o circa 3×10^8 anni. Le deviazioni dalle previsioni della meccanica quantistica standard sono quindi completamente negligibili per qualsiasi sistema atomico. 2. Per oggetti macroscopici ($N \sim 10^{23}$), il tasso di localizzazione effettivo è $N\lambda \sim 10^7$ s^{-1}: la sovrapposizione macroscopica collassa in un tempo $\sim 10^{-7}$ s. Il gatto di Schrödinger non può essere in sovrapposizione macroscopica perché la dinamica stessa lo localizza spontaneamente e quasi istantaneamente.

La proprietà di localizzazione si propaga alle particelle entangled attraverso la struttura della funzione d'onda nello spazio di configurazione. Se N particelle sono in uno stato entangled, una localizzazione spontanea su una particella ha effetti immediati sulla distribuzione delle altre — il meccanismo fisico attraverso cui il collasso «si propaga» al sistema composto.

La struttura probabilistica è auto-consistente: la probabilità che la localizzazione avvenga intorno a x_0 è $\left|\psi\left(x_0\right)\right|^2$ — esattamente la regola di Born per la posizione. Quindi GRW non è in contraddizione con le previsioni della meccanica quantistica standard nel limite in cui le localizzazioni spontanee sono trascurabili: per sistemi microscopici, le previsioni sono identiche. Le deviazioni emergono per sistemi mesoscopici, dove il tasso di localizzazione è intermedio.

4.5.3 — CSL: localizzazione continua e il suo formalismo stocastico

La versione continua **CSL** (Continuous Spontaneous Localization, Pearle, 1989) sostituisce i salti discreti di GRW con un processo stocastico di localizzazione continuo, tecnicamente più trattabile e fisicamente più naturale. L'equazione CSL è una equazione di Schrödinger stocastica non lineare:

$$d|\psi_t\rangle = \left[-\frac{i}{\hbar}\hat{H}\,dt + \sqrt{\gamma}\int d^3x\left(N(x) - \langle N(x)\rangle_t\right)dW_t(x) - \frac{\gamma}{2}\int d^3x\left(N(x) - \langle N(x)\rangle_t\right)^2 dt\right]|\psi_t\rangle,$$

dove $N(x) = \sum_i m_i \delta^{(3)}\left(\hat{x}_i - x\right)$ è un operatore densità di massa locale smussata, $\gamma \approx 10^{-30}$ $\mathrm{m^3 s^{-1}}$ è un parametro libero, e $dW_t(x)$ sono incrementi browniani indipendenti (rumore bianco spaziotemporale).

L'equazione CSL ha tre proprietà fondamentali: 1. **Non-linearità**: la presenza del termine $\langle N(x)\rangle_t$ rende l'equazione non-lineare nello stato $|\psi_t\rangle$. Questa non-linearità è necessaria per produrre il collasso. 2. **Stocasticità**: la presenza del rumore $dW_t(x)$ rende l'evoluzione stocastica. In media (integrando sul rumore), la matrice densità soddisfa una equazione di Lindblad, che è lineare. 3. **Localizzazione in massa**: il collasso favorisce stati localizzati della distribuzione di massa — è la distribuzione di massa, non il numero di particelle, che guida il collasso. Questo implica che oggetti pesanti collassano più rapidamente degli oggetti leggeri.

La proprietà di localizzazione in massa ha una conseguenza osservabile: un oggetto di massa m in una sovrapposizione di posizioni distanti d collasserà in un tempo

$$\tau_{CSL} \sim \frac{1}{\gamma}\left(\frac{m_0}{m}\right)^2\left(\frac{\sigma}{d}\right)^2$$

dove m_0 è la massa del nucleone. Per un oggetto di massa 1 g in una sovrapposizione di distanza 1 mm, $\tau_{CSL} \sim 10^{-7}$ s — indistinguibile dalla localizzazione istantanea sul piano macroscopico. Per un oggetto di massa 10^{-18} g (un cluster di 10^6 atomi), $\tau_{CSL} \sim 0.1$ s —

potenzialmente misurabile con interferometria molecolare di precisione.

4.5.4 — Il modello di Penrose-Diósi: collasso gravitazionale

Il modello di Penrose offre una motivazione fisica completamente diversa per il collasso. Penrose argomenta che la meccanica quantistica e la relatività generale sono incompatibili in un senso preciso: una sovrapposizione di due posizioni distinte di un oggetto massivo implica una sovrapposizione di due geometrie spaziotemporali diverse — perché la materia curva lo spaziotempo. Una tale sovrapposizione viola la struttura causale della relatività generale, che presuppone una geometria spaziotemporale ben definita. Il collasso è quindi imposto dalla struttura della relatività generale, non da un parametro libero aggiunto ad hoc.

Il rate di collasso nella proposta di Penrose è determinato dall'**energia gravitazionale di autointerazione** tra le due configurazioni della sovrapposizione:

$$\tau^{-1} \sim \frac{\Delta E_{grav}}{\hbar},$$

dove ΔE_{grav} è l'energia gravitazionale di sovrapposizione — l'energia necessaria per «separare» le due geometrie spaziotemporali corrispondenti alle due posizioni. Per una sfera di massa m e raggio r, $\Delta E_{grav} \sim Gm^2/r$, e il tempo di collasso è $\tau \sim \hbar r/\left(Gm^2\right)$. Per un protone, $\tau \sim 10^{37}$ anni — completamente negligibile. Per un oggetto di massa 10^{-8} kg (circa 10^{18} protoni), $\tau \sim 1$ s — potenzialmente osservabile.

Il modello di Diósi (1987) ha formalizzato quantitativamente questa proposta, ottenendo un'equazione di evoluzione stocastica formalmente simile a CSL ma con il parametro γ sostituito da una funzione della costante gravitazionale G e della struttura di massa del sistema. Il modello di Penrose-Diósi è distinto da GRW/CSL perché la sorgente del collasso non è un campo stocastico di fondo (come in CSL) ma la gravitazione stessa — la geometria dello spaziotempo come meccanismo fisico del collasso.

4.5.5 — Vincoli sperimentali e esperimenti in corso

Le teorie del collasso oggettivo producono deviazioni dalle previsioni della meccanica quantistica standard. Queste deviazioni sono piccole — progettate per essere trascurabili nei regimi sperimentali già esplorati — ma in linea di principio misurabili con tecniche di interferometria molecolare ad alta precisione.

I principali esperimenti in corso che cercano queste deviazioni operano con oggetti di massa crescente in stati di sovrapposizione spaziale. Alcuni risultati:

Interferometria molecolare: Il gruppo di Markus Arndt (Vienna) ha dimostrato interferenza quantistica per molecole di massa crescente — la molecola C_{60} (buckyball), poi porphyrine ($C_{44}H_{30}N_4$, massa ~ 614 u), poi tailor-made biomolecule ($PFNS10$, massa ~ 10000 u). I risultati sono consistenti con la meccanica quantistica standard, escludendo i parametri GRW con $\sigma \lesssim 10^{-9}$ m (più stretti del valore standard) o con $\lambda \gtrsim 10^{-10}$ s^{-1} (più grandi del valore standard).

Optomeccanica: Esperimenti con specchi meccanici raffreddati vicino allo stato fondamentale — il gruppo di Aspelmeyer (Vienna) ha dimostrato il raffreddamento di oscillatori meccanici con massa $\sim 10^{-11}$ g allo stato fondamentale quantistico — aprono la possibilità di testare la sovrapposizione quantistica di oggetti mesoscopici. Per la prossima generazione di esperimenti, si prevede di raggiungere masse $\sim 10^{-10}$ g in stati di sovrapposizione con separazione $\sim 10^{-9}$ m, dove le previsioni di GRW e CSL differiscono da quelle della meccanica quantistica standard di $\sim 10^{-5}$.

Esperimento MAQRO (Mass-Accreted Quantum Rotational Oscillator): Una proposta spaziale per testare la sovrapposizione quantistica di nanoparticelle di massa $\sim 10^{-18}$ kg in assenza di disturbi gravitazionali e termici terrestri. Se realizzato, permetterebbe di testare i modelli di collasso oggettivo nel range di masse dove le loro previsioni differiscono significativamente dalla meccanica quantistica standard.

Nessuno di questi esperimenti ha ancora trovato deviazioni dalla meccanica quantistica standard, il che restringe progressivamente lo

spazio dei parametri ammissibili per GRW, CSL e i modelli gravitazionali. Ma non esclude ancora i modelli standard con i parametri originali di Ghirardi, Rimini e Weber — che erano stati scelti precisamente per essere compatibili con gli esperimenti allora disponibili.

4.5.6 — Il significato delle teorie del collasso per la lettura della natura

Le teorie del collasso oggettivo sono filosoficamente le più interessanti per la tesi della monografia, perché rappresentano il tentativo più esplicito di *salvare la comprensione fisica modificando il formalismo*. Se il collasso è un processo fisico reale — governato da equazioni precise, con parametri misurabili — allora il fisico può costruire un modello intuitivo del mondo quantistico: oggetti che hanno posizioni definite, che tendono a localizzarsi spontaneamente quando le loro masse superano soglie critiche, e che si comportano come oggetti classici su scale macroscopiche proprio perché il collasso è rapido su quelle scale.

Questo modello è cognitivamente accessibile nel senso che il Blocco II ha analizzato: si può costruire un'immagine fisica del gatto di Schrödinger in una scatola — non una sovrapposizione di vivo e morto, ma un gatto che si localizza spontaneamente su scala $\sim 10^{-7}$ s, molto prima che si apra la scatola. Il collasso non richiede un osservatore: è un processo fisico che avviene indipendentemente dall'interazione con sistemi esterni. Il paradosso di Wigner — che §4.6 analizzerà — non compare nelle teorie del collasso oggettivo: l'amico di Wigner nel laboratorio isolato vede un risultato definito perché il collasso è avvenuto fisicamente, non perché il suo atto di osservazione l'ha prodotto.

Il costo è reale: si introduce un meccanismo fisico senza motivazione teorica profonda — i parametri λ e σ (o γ in CSL) sono liberi, determinati solo dall'esigenza di separare il regime microscopico da quello macroscopico. Ma il modello penrosiano suggerisce che questa motivazione possa venire dalla gravitazione — dalla struttura

dello spaziotempo — il che trasforma il collasso da postulato ad hoc a conseguenza di principi fisici più profondi.

---

§ 4.6 — Il paradosso di Wigner e le sue implicazioni per l'intelligenza artificiale

4.6.1 — La struttura del paradosso: due descrizioni incompatibili

Il **paradosso di Wigner** (1961) — noto come «l'amico di Wigner» (*Wigner's friend*) — è una variante del paradosso di Schrödinger che introduce esplicitamente un osservatore umano cosciente come parte della catena von Neumanniana, e che per questa ragione ha assunto rilevanza crescente nel contesto delle discussioni sull'intelligenza artificiale e sulla questione di cosa costituisca un «osservatore» fisico.

Il setup è il seguente. Un fisico — «l'amico di Wigner» (F) — esegue una misura di spin su un elettrone in uno stato $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle)$ all'interno di un laboratorio isolato. Dall'interno del laboratorio, F osserva un risultato definito — diciamo spin-up — e la funzione d'onda è collassata dal suo punto di vista. Wigner (W), all'esterno, non ha accesso al risultato della misura: per lui, il sistema composito F + laboratorio + elettrone è ancora in evoluzione unitaria, e lo stato del sistema è la sovrapposizione

$$\left|\Psi\right\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}\left(\left|\uparrow\right\rangle_e \left|F_{\uparrow}\right\rangle + \left|\downarrow\right\rangle_e \left|F_{\downarrow}\right\rangle\right),$$

dove $|F_{\uparrow}\rangle$ e $|F_{\downarrow}\rangle$ sono gli stati dell'amico che ha visto spin-up e spin-down rispettivamente.

La tensione è precisamente questa: F descrive il sistema come collassato in uno stato definito; W descrive il sistema come una sovrapposizione. Entrambe le descrizioni sono fisicamente corrette dal punto di vista di ciascun agente, e sono mutuamente incompatibili come descrizioni dello stesso sistema fisico all'istante in cui la misura è stata completata.

4.6.2 — Il teorema di Frauchiger e Renner: una contraddizione formale

La versione moderna del paradosso — il **teorema di Frauchiger e Renner** (2018, *Nature Communications*) — porta l'argomento a un livello di formalizzazione molto più alto e dimostra non una tensione ma una contraddizione logica precisa.

Lo scenario coinvolge quattro agenti e due laboratori. Il laboratorio L_1 contiene l'amico F_1, che misura lo spin di un qubit preparato in uno stato dipendente da una moneta quantistica. Il laboratorio L_2 contiene l'amico F_2, che misura un diverso qubit. Wigner (W_1) esegue una misura di tipo Hadamard sull'intero laboratorio L_1 (trattando F_1 come un sistema quantistico), e Wigner 2 (W_2) esegue lo stesso su L_2.

Frauchiger e Renner dimostrano che, sotto tre assunzioni che sembrano indipendentemente plausibili, i quattro agenti raggiungono conclusioni logicamente contradditorie sullo stesso fatto fisico:

Assunzione (Q): La meccanica quantistica è universalmente valida, inclusa la sua applicazione a sistemi fisici che contengono osservatori.

Assunzione (C): Ogni agente può applicare il ragionamento degli altri agenti come parte del proprio ragionamento. Se F_1 ha ragione di concludere X, W_1 può usare questa conclusione nel proprio ragionamento.

Assunzione (S): Le predizioni della meccanica quantistica sono assolute — un agente che afferma «misurerò l'outcome x» fa un'affermazione su un fatto che è vero o falso indipendentemente dall'agente che la valuta.

Il teorema dimostra che (Q), (C) e (S) sono mutuamente inconsistenti: esistono scenari in cui i quattro agenti, ognuno ragionando correttamente secondo le proprie assunzioni, raggiungono conclusioni contraddittorie su ciò che sarà misurato. La struttura della contraddizione è formale — deriva dalla struttura dell'evoluzione unitaria e dalla regola di Born applicata in modi diversi da agenti con diverso accesso informazionale al sistema.

Le diverse interpretazioni rispondono al teorema abbandonando assunzioni diverse: - **Copenaghen** abbandona (Q): la meccanica quantistica non si applica agli osservatori macroscopici come sistemi quantistici - **Molti mondi** abbandona (S): le previsioni della meccanica quantistica sono relative al ramo in cui si trova l'agente - **Meccanica di Bohm** mantiene (Q) e (S) ma risolve la contraddizione attraverso la non-località del campo guida - **GRW/CSL** abbandona (Q) nel senso che modifica l'equazione di Schrödinger, eliminando la possibilità di mantenere F_1 in sovrapposizione per tempi lunghi - **Interpretazione relazionale** (Rovelli) abbandona (S): le descrizioni quantistiche sono relative al sistema di riferimento fisico dell'agente

Il teorema di Frauchiger e Renner è una mappa precisa delle strutture concettuali che ogni interpretazione deve modificare per evitare la contraddizione. Non è una falsificazione della meccanica quantistica: è una prova che la meccanica quantistica non può essere interpretata in modo da soddisfare simultaneamente le tre assunzioni.

4.6.3 — La posizione originale di Wigner: coscienza come collasso

Nella sua posizione originale (1961), Wigner sostiene che la coscienza dell'amico abbia una proprietà fisica speciale — la capacità di produrre il collasso — e che i sistemi non coscienti (inclusi gli apparati macroscopici) non abbiano questa proprietà. Il collasso non è prodotto dall'interazione con qualsiasi sistema fisico di massa sufficiente, come nella decoerenza o nelle teorie del collasso oggettivo: è prodotto specificamente dall'interazione con un sistema cosciente.

Questa posizione — nota come **interpretazione di Wigner** o interpretazione coscienzialista — ha la struttura argomentativa più netta tra tutte le interpretazioni: identifica in modo preciso il meccanismo del collasso. Ma paga il prezzo filosofico di attribuire un ruolo fisico privilegiato alla coscienza — di fare della coscienza una grandezza fisicamente rilevante, capace di modificare l'evoluzione della funzione d'onda. Questo implica che la fisica del collasso non

può essere compresa senza una teoria della coscienza, che la fisica non ha.

Wigner stesso abbandonò questa posizione in anni successivi, muovendosi verso una concezione più vicina all'interpretazione di Copenaghen. Ma la struttura del paradosso che portava il suo nome rimase, e divenne centrale nel dibattito fondazionale degli anni 2010.

4.6.4 — Implicazioni per l'intelligenza artificiale: chi conta come osservatore?

Il paradosso di Wigner assume rilevanza diretta per le questioni di intelligenza artificiale applicata alla fisica attraverso due domande distinte, entrambe filosoficamente rilevanti anche se metodologicamente diverse.

La prima domanda è **ontologica**: se il collasso richiede un osservatore cosciente — come Wigner sosteneva originalmente — i sistemi di intelligenza artificiale di sufficiente complessità contano come osservatori fisici nel senso che produce il collasso? Il sistema AlphaFold, o una rete neurale per la meccanica quantistica computazionale, produce il collasso della funzione d'onda quando elabora i risultati di una misura? La domanda sembra assurda dal punto di vista della fisica sperimentale — non c'è nessun esperimento che distingua il collasso prodotto da un osservatore umano da quello prodotto da un apparato automatico — ma ha una struttura concettuale precisa, e la risposta dipende da una teoria della coscienza che né la fisica né l'informatica possiede.

La seconda domanda è **epistemologica**: il paradosso di Wigner illustra in forma acuta il problema della **prospettiva** nella meccanica quantistica. La descrizione dello stato fisico dipende dall'agente che la produce e dal suo accesso informazionale al sistema. Non c'è nessuna descrizione del mondo fisico che sia indipendente dalla prospettiva dell'agente — nessuna «view from nowhere» nel senso di Thomas Nagel. Questa dipendenza dalla prospettiva è strutturalmente inscritta nella meccanica quantistica come conseguenza della struttura della misura.

Per un sistema di intelligenza artificiale, la questione della prospettiva si pone in forma peculiare. Un sistema come AlphaFold elabora dati — input di sequenze proteiche, output di strutture tridimensionali — senza avere una prospettiva fisica nel senso che la meccanica quantistica richiede. Il sistema non è «situato» in un contesto fisico di misura: è un algoritmo che elabora informazioni, non un agente che effettua misure. Quando AlphaFold calcola la struttura tridimensionale di una proteina, non sta «misurando» la proteina nel senso fisico — non è in interazione fisica con il sistema che descrive. Questa assenza di situatività fisica è precisamente ciò che distingue l'elaborazione artificiale dalla comprensione fisica: la comprensione fisica è sempre la comprensione di un agente situato che interagisce causalmente con il sistema fisico che descrive.

Il paradosso di Wigner rende questa distinzione sperimentalmente rilevante: in un esperimento di tipo Wigner's friend, la descrizione che l'amico fa del sistema — dopo aver eseguito la misura e aver ottenuto un risultato definito — è irriducibilmente prospettica, dipendente dall'interazione fisica che l'amico ha avuto con il sistema. Un sistema di IA che elabora l'output dell'amico — i dati della misura — non acquista per questo la prospettiva dell'amico. Acquista informazione sulla prospettiva dell'amico, che è una cosa diversa.

Questa distinzione — tra avere una prospettiva e avere informazione su una prospettiva — è la forma specifica, nel contesto del paradosso di Wigner, della più generale distinzione tra comprensione fisica e prestazione computazionale che la monografia sviluppa. La lettura della natura è sempre situata: è la comprensione di un agente che abita un punto di vista fisico, che ha interazioni causali con il mondo fisico, che costruisce un modello del mondo a partire dalla propria prospettiva incorporata. Un sistema artificiale che elabora dati senza abitare una prospettiva fisica non legge la natura: elabora descrizioni della natura prodotte da agenti che la leggono.

Riferimenti principali per §§4.3-4.6: Everett (1957), «"Relative State" Formulation of Quantum Mechanics», *Reviews of Modern Physics*;

Deutsch (1999), «Quantum Theory of Probability and Decisions», *Proceedings of the Royal Society A*; Wallace (2012), *The Emergent Multiverse*, Oxford University Press; Zurek (2003), «Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical», *Reviews of Modern Physics*; Bohm (1952), «A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables I e II», *Physical Review*; Bell (1987), *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*, Cambridge; Holland (1993), *The Quantum Theory of Motion*, Cambridge; Dürr, Goldstein e Zanghì (1992), «Quantum Equilibrium and the Origin of Absolute Uncertainty», *Journal of Statistical Physics*; Ghirardi, Rimini e Weber (1986), «Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems», *Physical Review D*; Pearle (1989), «Combining Stochastic Dynamical State-Vector Reduction with Spontaneous Localization», *Physical Review A*; Penrose (1996), «On Gravity's Role in Quantum State Reduction», *General Relativity and Gravitation*; Diósi (1987), «A Universal Master Equation for the Gravitational Violation of Quantum Mechanics», *Physics Letters A*; Wigner (1961), «Remarks on the Mind-Body Question», in Good (a cura di), *The Scientist Speculates*; Frauchiger e Renner (2018), «Quantum Theory Cannot Consistently Describe the Use of Itself», *Nature Communications*; Arndt et al. (2014), «Testing the Limits of Quantum Mechanical Superpositions», *Nature Physics*; Nagel (1986), *The View from Nowhere*, Oxford University Press.

§ 4.7 — L'interpretazione relazionale e la QBism: prospettiva come principio

Due interpretazioni più recenti meritano una nota perché spingono il tema della prospettiva in direzioni diverse, e perché articolano in modo preciso — da angoli diversi — la tesi che la descrizione fisica sia irriducibilmente relativa a un agente.

L'**interpretazione relazionale** di Carlo Rovelli (1996) sostiene che lo stato quantistico è sempre uno stato relativo a un sistema di riferimento fisico: non esiste uno stato assoluto di un sistema, ma solo lo stato di quel sistema rispetto a un altro sistema fisico che con esso interagisce. La funzione d'onda $|\psi\rangle_{S|R}$ descrive lo stato del

sistema S relativo all'agente osservatore R. Diversi agenti possono avere descrizioni diverse dello stesso sistema fisico, e queste descrizioni non si devono necessariamente concordare — finché non entrano in interazione fisica. Non c'è contraddizione in questo: le descrizioni sono relative a diversi sistemi di riferimento, esattamente come in relatività speciale le coordinate spaziotemporali di un evento sono relative a diversi sistemi inerziali, senza che questo implichi contraddizione. Il collasso, nell'interpretazione relazionale, è il passaggio da uno stato relativo a un agente a uno stato relativo a un agente diverso, attraverso un'interazione fisica.

La **QBism** (Quantum Bayesianism, nelle versioni di Fuchs, Mermin e Schack) sostiene che la funzione d'onda è una rappresentazione degli stati epistemici di un agente — un agente *irriducibilmente individuale*, non un soggetto fisico arbitrario — e che il collasso è l'aggiornamento delle credenze bayesiane dell'agente alla luce del risultato della misura. La differenza rispetto a Copenaghen è che la QBism specifica che la soggettività coinvolta è quella di un *singolo agente* con una storia esperienziale, non la «comunità della fisica» o l'«osservatore classico» di Bohr. Fuchs usa l'analogia con le probabilità soggettive nella teoria bayesiana della probabilità: così come la probabilità non esiste nella natura ma nelle credenze di un agente, lo stato quantistico non esiste nella natura ma nelle credenze di un agente circa le sue future esperienze.

Entrambe le interpretazioni — relazionale e QBism — convergono su un punto che è direttamente rilevante per la tesi della monografia: la descrizione fisica quantistica è irriducibilmente prospettica, relativa a un agente. Non esiste il punto di vista di «nessun luogo» in cui tutti gli agenti concordano su una descrizione oggettiva. Questa struttura prospettica è esattamente ciò che rende la comprensione fisica — nel senso della lettura della natura — distinta dall'elaborazione di dati: la comprensione fisica è l'attività di un agente situato che costruisce una descrizione in prospettiva del mondo fisico, e questa attività non è riproducibile da un sistema artificiale che elabora dati senza essere fisicamente situato in un contesto di esperienza.

---

§ 4.8 — La forma inversa di Gödel: completezza senza comprensione

Il Blocco IV si chiude con la formulazione precisa del nucleo filosofico della monografia, che l'Introduzione aveva anticipato in forma evocativa e che i paragrafi precedenti hanno preparato con la ricchezza di dettaglio necessaria.

I teoremi di incompletezza di Gödel — che la seconda monografia di questa serie ha analizzato in dettaglio — stabiliscono che ogni sistema formale sufficientemente ricco e coerente contiene enunciati veri ma indimostrabili: la verità matematica eccede la dimostrabilità formale. Questo è un risultato di **incompletezza formale**: il formalismo è strutturalmente insufficiente a catturare tutta la verità del dominio che descrive. Il matematico che riconosce la verità della proposizione gödeliana G_T esercita una visione di struttura che trascende il sistema formale T — vede dall'esterno ciò che il sistema non può vedere dall'interno.

La situazione della meccanica quantistica è strutturalmente inversa, e la sua inversione è tanto più sconcertante quanto più si è presa sul serio la lezione gödeliana. Il formalismo della meccanica quantistica è **completo** nel senso predittivo: per ogni esperimento fisico concepibile, nei limiti del suo dominio di applicabilità, produce previsioni precise sulle distribuzioni di probabilità degli outcomes, e queste previsioni concordano con i risultati sperimentali con una precisione senza precedenti nella storia della scienza. L'equazione di Schrödinger

$$i\hbar\frac{\partial}{\partial t}\left|\psi(t)\right\rangle = \hat{H}\left|\psi(t)\right\rangle$$

descrive l'evoluzione di ogni sistema fisico non relativistico con precisione assoluta. La regola di Born $p\left(a_k\right) = \left|\langle a_k|\psi\rangle\right|^2$ produce le distribuzioni di probabilità corrette per ogni esperimento mai effettuato. Non esiste, nei limiti di validità della meccanica quantistica non relativistica — e, con le opportune generalizzazioni, della teoria quantistica dei campi — nessun fenomeno fisico che il formalismo non sia in grado di trattare.

Eppure la comprensione del formalismo — nel senso di sapere cosa esso descriva, quale struttura del mondo fisico catturi, come si concili con l'esperienza macroscopica — è radicalmente aperta. Le cinque interpretazioni dei paragrafi precedenti (più le due del § 4.7) sono risposte incompatibili a questa domanda, tutte coerenti con il formalismo, nessuna falsificabile nei regimi attualmente accessibili. La completezza predittiva non implica la comprensione fisica: si può predire tutto senza capire cosa si stia descrivendo, che è la forma inversa del paradosso gödeliano.

La struttura del paradosso merita di essere precisata in forma matematica. Sia F il formalismo della meccanica quantistica (spazi di Hilbert, operatori, equazione di Schrödinger, regola di Born). Sia E l'insieme di tutte le previsioni empiriche — le distribuzioni di probabilità su tutti gli esperimenti concepibili. Sia I l'insieme delle possibili interpretazioni fisiche — le risposte alla domanda «cosa descrive F?». Allora:

1. F è **predittivamente completo**: per ogni $e \in E$, esiste una derivazione formale in F che produce la previsione corretta;
2. F è **interpretativamene indeterminato**: per ogni $i \in I$ compatibile con le previsioni empiriche, il formalismo non contiene nessun argomento formale che selezioni i rispetto alle altre interpretazioni;
3. $|I|$ è grande (attualmente almeno sei interpretazioni principali) e ogni elemento è radicalmente incompatibile con gli altri sul piano ontologico.

Questa struttura — completezza predittiva con indeterminatezza interpretativa — è la forma inversa del teorema di Gödel. Gödel mostra che $|V| > |D|$ dove V sono le verità del dominio e D le dimostrabilità del sistema: la verità eccede la dimostrabilità. La meccanica quantistica mostra che la completezza predittiva — F copre tutto E — non implica la comprensione ontologica: $|I|$ rimane grande. La correttezza non implica la comprensione.

Wigner lo formula come «l'irragionevole efficacia della matematica nelle scienze naturali» — il fatto sconcertante che strutture

matematiche sviluppate per ragioni puramente interne alla matematica si rivelino straordinariamente adatte a descrivere la struttura del mondo fisico. Ma il paradosso della meccanica quantistica non è solo che la matematica è efficace: è che l'efficacia è così completa da render superflua, in senso predittivo, la comprensione fisica. Il sistema di Bohr-Heisenberg che tace sull'ontologia fisica produce previsioni indistinguibili da quello di Everett-Wallace che popola l'universo di rami infiniti, e da quello di Bohm che introduce l'onda pilota non locale, e da quello di Ghirardi-Rimini-Weber che modifica l'equazione di Schrödinger. La comprensione fisica è separata, per struttura del dominio, dalla capacità predittiva.

Le implicazioni di questa struttura per la tesi della monografia sono dirette. La lettura della natura — la comprensione fisica come costruzione di un modello fisicamente abitato del mondo — non si riduce alla capacità di produrre previsioni corrette. La meccanica quantistica lo dimostra nel caso più estremo possibile: il formalismo produce previsioni più corrette di qualsiasi altra teoria fisica nella storia, e tuttavia i fisici non concordano su quale modello del mondo fisico esso descriva. Un sistema artificiale che apprende a produrre previsioni quantisticamente corrette — come i sistemi di apprendimento automatico per la struttura elettronica degli atomi e delle molecole che il Blocco V analizzerà — non possiede per questo una comprensione fisica della meccanica quantistica. Possiede qualcosa di diverso, e precisamente questo diverso — la prestazione senza comprensione — è la manifestazione specifica, nel dominio dell'intelligenza artificiale applicata alla fisica, del paradosso della completezza che questo blocco ha formulato.

Riferimenti principali: Bohr (1927), «The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory», *Nature*; Einstein, Podolsky e Rosen (1935), «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?», *Physical Review*; Everett (1957), «"Relative State" Formulation of Quantum Mechanics», *Reviews of Modern Physics*; Bohm (1952), «A Suggested Interpretation of the

Quantum Theory in Terms of “Hidden” Variables», *Physical Review*; Bell (1964), «On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox», *Physics*; Ghirardi, Rimini e Weber (1986), «Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems», *Physical Review D*; Wigner (1961), «Remarks on the Mind-Body Question», in Good (a cura di), *The Scientist Speculates*; Frauchiger e Renner (2018), «Quantum Theory Cannot Consistently Describe the Use of Itself», *Nature Communications*; Rovelli (1996), «Relational Quantum Mechanics», *International Journal of Theoretical Physics*; Fuchs, Mermin e Schack (2014), «An Introduction to QBism with an Application to the Locality of Quantum Mechanics», *American Journal of Physics*; Deutsch (1997), *The Fabric of Reality*, Penguin; Wallace (2012), *The Emergent Multiverse*, Oxford University Press; Holland (1993), *The Quantum Theory of Motion*, Cambridge University Press; Zurek (2003), «Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical», *Reviews of Modern Physics*; Wigner (1960), «The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences», *Communications on Pure and Applied Mathematics*.

Blocco V — Le macchine che scoprono

AlphaFold, la scoperta simbolica delle leggi e l’intelligenza artificiale in fisica

---

§ 5.1 — Il problema del ripiegamento proteico e la sua storia

Prima di analizzare ciò che AlphaFold fa — e ciò che non fa — occorre capire la struttura del problema che risolve, perché è nella struttura del problema che si nasconde la distinzione tra prestazione e comprensione fisica. Questa distinzione non è accessoria: è il punto d’ingresso dell’intera argomentazione del Blocco V, e richiede una trattazione che vada al di là della semplice descrizione del problema

computazionale, per raggiungere la fisica sottostante con la precisione formale che essa merita.

Una proteina è una catena di amminoacidi — una sequenza di unità elementari scelte tra venti possibili, dette residui — che si ripega spontaneamente in una struttura tridimensionale specifica nell'arco di millisecondi dall'uscita dal ribosoma. Questa struttura tridimensionale — la **struttura terziaria** della proteina — determina interamente la funzione biologica: enzimi, recettori, anticorpi, canali ionici sono ciò che sono perché la loro forma permette interazioni specifiche, geometricamente selettive, con altre molecole. Il problema del ripiegamento è: data la sequenza primaria di amminoacidi, determinare la struttura tridimensionale.

Il problema è fisicamente ben definito e matematicamente preciso. Lo stato nativo della proteina è quello che minimizza l'energia libera di Gibbs del sistema proteina-solvente,

$$G = H - TS,$$

dove H è l'entalpia del sistema — che comprende l'energia cinetica, le interazioni coulombiane, i legami covalenti, i legami a idrogeno, le interazioni di van der Waals, le interazioni idrofobiche con l'acqua — T è la temperatura assoluta e S è l'entropia, che include sia la componente conformazionale (il numero di configurazioni accessibili alla catena polipeptidica) sia la componente del solvente (l'entropia dell'acqua che circonda la proteina). Il minimo della funzione G nello spazio conformazionale definisce la struttura nativa.

La funzione di partizione del sistema a temperatura T è

$$Z = \int_{\Gamma} e^{-G(q)/k_B T}\, dq,$$

dove l'integrale corre su tutto lo spazio conformazionale Γ della proteina e k_B è la costante di Boltzmann. La struttura nativa è il minimo globale di $G(q)$, e la sua probabilità di occupazione all'equilibrio è

$$P_{nativo} = \frac{e^{-G_{nativo}/k_B T}}{Z}.$$

Per temperature fisiologiche, la struttura nativa è quella con probabilità di occupazione dominante, ma lo spazio conformazionale Γ è uno spazio di dimensione altissima: per una proteina di n residui, il numero di gradi di libertà conformazionali è dell'ordine di $2n$ angoli diedri $\left(\phi_i, \psi_i\right)$ per il backbone, più le rotazioni delle catene laterali. Anche con una discretizzazione grossolana di tre valori per ciascun angolo, il numero di configurazioni è 3^{2n}: per $n = 100$, circa 10^{95} configurazioni. Il calcolo diretto della funzione di partizione, o anche la ricerca del minimo globale per esplorazione esaustiva, è computazionalmente impossibile.

Questo è il **paradosso di Levinthal** (1969): se la proteina esplorasse casualmente tutte le conformazioni possibili, campionandole a una frequenza di 10^{13} s^{-1} — l'ordine di grandezza della frequenza di oscillazione molecolare — il tempo di ricerca supererebbe l'età dell'universo per proteine di lunghezza media. Eppure le proteine si ripiegano in millisecondi. Il ripiegamento non è una ricerca esaustiva dello spazio conformazionale: è un processo fisico che sfrutta la struttura del paesaggio energetico per raggiungere il minimo globale attraverso percorsi cineticamente accessibili.

Il **paesaggio energetico** del ripiegamento — la superficie di energia libera $G(q)$ come funzione delle coordinate conformazionali — è il concetto fisico centrale per comprendere perché il ripiegamento sia rapido nonostante la vastità dello spazio configurazionale. Wolynes, Onuchic, Dill e colleghi hanno sviluppato negli anni Novanta la **teoria del funnel energetico**: il paesaggio energetico di una proteina che si ripiega correttamente ha la forma di un imbuto — in forma quantitativa, una superficie con una componente sistematicamente decrescente verso la struttura nativa, sovrapposta a rugosità locali che rappresentano i minimi metastabili. Si definisce la **rugosità** del paesaggio attraverso il parametro

$$\delta E_{rug}^2 = \langle E(q)^2 \rangle_\Gamma - \langle E(q) \rangle_\Gamma^2,$$

e la condizione di ripiegamento efficiente richiede che il guadagno energetico verso la struttura nativa

$$\Delta E_{funnel} = \langle E \rangle_{denaturato} - E_{nativo}$$

soddisfi $\Delta E_{funnel} \gg \delta E_{rug}$, cioè che il funnel sia abbastanza profondo rispetto alla rugosità locale da garantire che il flusso cinetico si diriga verso il minimo globale. Il parametro $\sigma_{rug}/\Delta E_{funnel}$ è il discriminante tra sequenze che si ripiegano in modo affidabile — «buone sequenze» nel senso evolutivo — e sequenze che rimangono bloccate in minimi locali. La selezione naturale ha conservato le sequenze aminoacidiche il cui paesaggio energetico soddisfa questa condizione: il funnel non è una proprietà universale delle proteine, è una proprietà delle proteine che l'evoluzione ha selezionato.

Questa comprensione fisica del ripiegamento — la teoria del funnel come spiegazione causale del fatto che il ripiegamento avviene e avviene rapidamente — è il prodotto di decenni di lavoro teorico, computazionale e sperimentale che costituisce la comprensione fisica del problema. La competizione CASP — *Critical Assessment of protein Structure Prediction* — organizza dal 1994 la valutazione sistematica dei metodi computazionali di predizione della struttura proteica, ed è stata per venticinque anni il banco di prova di questa comprensione. Per venticinque anni, i progressi sono stati graduali: i migliori metodi raggiungevano accuratezze dell'ordine dei 5-10 ångström di deviazione quadratica media (*root mean square deviation*, RMSD) dalla struttura cristallografica, che è insufficiente per la maggior parte delle applicazioni biologiche.

La *RMSD* tra la struttura predetta $\{r_i^{pred}\}$ e la struttura sperimentale $\{r_i^{exp}\}$ per N atomi del backbone è definita come

$$RMSD = \sqrt{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|r_i^{pred} - r_i^{exp}\right|^2},$$

dopo ottimizzazione della sovrapposizione rigida tra le due strutture. In CASP14 (2020), AlphaFold2 produce strutture con RMSD media inferiore a 1 ångström dalla struttura cristallografica per la maggior parte dei target — la precisione della cristallografia a raggi X. È un salto qualitativo di un ordine di grandezza rispetto ai

migliori metodi precedenti, e la comunità biologica lo ha riconosciuto come trasformativo. Ma la domanda che il Blocco V pone è diversa da quella che la comunità biologica ha celebrato: in che senso AlphaFold2 *comprende* il ripiegamento proteico?

---

§ 5.2 — Come funziona AlphaFold2: architettura senza fisica

L'architettura di AlphaFold2, descritta nel *paper* di Jumper et al. (2021) su *Nature*, è una rete neurale profonda di circa 93 milioni di parametri addestrata su circa 170.000 strutture proteiche depositate nel Protein Data Bank. La comprensione della sua architettura è necessaria per valutare con precisione cosa essa faccia e cosa non faccia, e richiede una descrizione formale che vada al di là della metafora.

L'input principale è la **sequenza aminoacidica** della proteina — una stringa $a = \left(a_1, a_2, ..., a_L\right) \in \{1, ..., 20\}^L$ di L residui. AlphaFold2 costruisce due rappresentazioni intermedie che iterativamente si informano e si aggiornano. La prima è la **Multiple Sequence Alignment** (MSA), una matrice $M \in R^{D \times L \times c}$ che raccoglie le sequenze omologhe della proteina in altri organismi e cattura le co-evoluzioni statistiche tra coppie di residui: se il residuo i muta spesso in concomitanza con il residuo j attraverso le specie, i due residui tendono a essere spazialmente vicini nella struttura nativa perché la co-evoluzione segnala un contatto fisico. La seconda è la **rappresentazione a coppie**, una matrice $Z \in R^{L \times L \times c'}$ che codifica le relazioni spaziali potenziali tra ogni coppia di residui (i, j).

Queste rappresentazioni vengono elaborate dall'**Evoformer** — 48 strati di *attention* multi-testa che aggiornano iterativamente le rappresentazioni MSA e a coppie in modo mutuamente informativo. In ciascuno strato, l'aggiornamento della rappresentazione MSA avviene attraverso un meccanismo di *row attention* con bias derivato dalla rappresentazione a coppie:

$$MSA'_{si} = Softmax\left(\frac{Q_{si} K^T_{si}}{\sqrt{d_k}} + Z_{ij}\right) V_{si},$$

dove Q_{si}, K_{si}, V_{si} sono query, key e value estratti dalla riga s della matrice MSA, e il termine Z_{ij} introduce il segnale spaziale dalla rappresentazione a coppie. L'aggiornamento della rappresentazione a coppie avviene attraverso un meccanismo di *triangle multiplication* — una operazione che aggiorna Z_{ij} sfruttando la struttura triangolare delle relazioni tra triple di residui (i, j, k):

$$Z'_{ij} = \sum_k Z_{ik} \odot Z_{kj},$$

nella sua forma semplificata. Questo meccanismo di aggiornamento triangolare non ha una giustificazione fisica esplicita nel senso della fisica del ripiegamento: è una scelta architetturale ispirata dall'osservazione empirica che le relazioni geometriche tra residui hanno struttura transitiva — se il residuo i è vicino al residuo k e il residuo k è vicino al residuo j, c'è informazione su Z_{ij} — ma la scelta della forma funzionale è determinata dall'ottimizzazione, non da principi fisici.

Il **modulo di struttura** costruisce la struttura tridimensionale rappresentando ogni residuo i come un sistema di riferimento locale $T_i = (R_i, t_i) \in SE(3)$ — una rotazione $R_i \in SO(3)$ e una traslazione $t_i \in R^3$ — e aggiornando questi sistemi di riferimento attraverso un meccanismo di *Invariant Point Attention* (IPA) che è invariante rispetto alle rototraslazioni globali: se si ruota e trasla l'intera struttura, le energie di attenzione rimangono invariate. Questa invarianza non è appresa dai dati: è garantita dalla progettazione dell'architettura.

Il punto cruciale per l'argomento del Blocco V è la relazione tra questa architettura e la fisica del ripiegamento. AlphaFold2 non minimizza esplicitamente nessuna funzione di energia libera $G(q)$. Non risolve l'equazione di Schrödinger per il sistema proteina-solvente. Non implementa la teoria del funnel energetico di Wolynes e Onuchic. Non calcola le interazioni di van der Waals, i legami a idrogeno, le interazioni idrofobiche come grandezze fisiche esplicite con forma funzionale derivata dalla meccanica quantistica. Apprende, dai 170.000 dati di addestramento, una mappatura

statistica $f_\theta: \{1, ..., 20\}^L \to R^{3L}$ dalla sequenza aminoacidica alle coordinate tridimensionali degli atomi del backbone, dove θ sono i 93 milioni di parametri ottimizzati attraverso discesa del gradiente stocastica su una funzione di perdita che penalizza la deviazione dalla struttura cristallografica nei dati di addestramento.

La co-evoluzione catturata dalla MSA è il principale segnale statistico che AlphaFold2 sfrutta. Sia c_{ij} la covarianza statistica tra le mutazioni al sito i e le mutazioni al sito j attraverso l'allineamento multiplo di sequenze. I metodi di accoppiamento diretto (*direct coupling analysis*, DCA) modellano la distribuzione $P(a_1, ..., a_L)$ come un modello di Potts:

$$P(a_1, ..., a_L) = \frac{1}{Z} exp\left(\sum_i h_i(a_i) + \sum_{i<j} J_{ij}(a_i, a_j)\right),$$

dove h_i sono campi locali e J_{ij} sono le matrici di accoppiamento diretto tra siti. Le coppie (i, j) con $|J_{ij}|$ grande — con forte accoppiamento diretto, distinguibile dalle correlazioni indirette mediate da terzi siti — tendono a essere in contatto strutturale nella proteina nativa. Questa analisi, sviluppata da Weigt, Sander, Marks e colleghi, era nota e sfruttata dai metodi precedenti ad AlphaFold2, ma l'architettura Evoformer integra questo segnale con una profondità e una ricchezza di rappresentazione che i metodi precedenti non raggiungevano.

La rete apprende implicitamente i vincoli geometrici che la fisica determina — legami a idrogeno, interazioni idrofobiche, vincoli sterici — non come principi fisici espliciti ma come pattern statistici nelle strutture osservate. Questa distinzione — tra apprendere la fisica come principio e apprenderla come statistica — è centrale per il Blocco V, e può essere resa precisa attraverso due differenze operative.

La **prima differenza** è la trasparenza causale. AlphaFold2 non può essere interrogato su *perché* una struttura ha la geometria che ha — quale interazione fisica stabilizza quale contatto, quale termine dell'energia libera domina nella regione di struttura secondaria

osservata — perché queste relazioni causali non sono rappresentate nel modello. I pesi θ della rete codificano correlazioni statistiche tra sequenza e struttura, non spiegazioni fisiche della relazione. Un biofisico che comprende la struttura proteica può rispondere alla domanda «perché questo segmento forma un'elica α?» invocando la stabilizzazione per legami a idrogeno intraelicali tra i gruppi $N - H$ del residuo i e i gruppi $C = O$ del residuo $i - 4$, con geometria di legame ottimale per l'angolo diedro $(\phi, \psi) \approx (-57°, -47°)$; AlphaFold2 predice l'elica correttamente ma non ha accesso a questa spiegazione.

La **seconda differenza** è la generalizzazione *out-of-distribution*. AlphaFold2 generalizza efficientemente all'interno della distribuzione statistica delle proteine rappresentate nel Protein Data Bank — proteine con omologhi evolutivi, con strutture ricorrenti come le eliche e i foglietti β, con sequenze che rientrano nello spazio coperto dall'addestramento. Generalizza male fuori di essa: per proteine *de novo* senza omologhi evolutivi noti, o per strutture proteiche significativamente diverse dalla distribuzione di addestramento, le performance degradano. Un fisico che comprende la teoria del funnel può ragionare su queste proteine sfruttando principi generali — la condizione $\Delta E_{funnel} \gg \delta E_{rug}$, la sequenza di eventi nell'iniziazione del ripiegamento, il ruolo del nucleo idrofobico — anche in assenza di omologhi; AlphaFold2, privo di quella struttura di principi, non può.

---

§ 5.3 — La scoperta simbolica delle leggi: il sistema AI Feynman e il problema della comprensione

5.3.1 — Perché AI Feynman è il caso più rilevante per la tesi

Se AlphaFold2 è il caso più celebre di intelligenza artificiale applicata alla fisica e alla biofisica — e la sezione precedente ha mostrato con precisione in che senso la sua correttezza è separata dalla comprensione fisica del ripiegamento proteico — la **scoperta simbolica delle leggi fisiche** è il caso più direttamente rilevante per

la tesi della monografia. La differenza non è di grado ma di livello: AlphaFold2 predice una struttura tridimensionale, che è una proprietà fisica di un sistema specifico; la scoperta simbolica produce equazioni che i fisici riconoscono come *leggi* — relazioni universali che descrivono la struttura del mondo fisico indipendentemente dal sistema specifico. Predire la struttura di una proteina è risolvere un problema di fisica della materia condensata con grande efficacia; trovare simbolicamente la legge di gravitazione universale è avvicinarsi al processo attraverso cui Newton comprese il comportamento dei corpi celesti.

Questa distinzione di livello è cruciale per la tesi della monografia. La domanda centrale — cosa è la comprensione fisica, e in che senso i sistemi artificiali non la possiedono pur producendo previsioni corrette — si pone con diversa acuità a questi due livelli. Per AlphaFold2, si può argomentare che la previsione strutturale è un problema tecnico, e che la comprensione fisica (la biofisica del ripiegamento) è qualcosa di separato ma non direttamente contraddetto dalla prestazione della rete. Per la scoperta simbolica delle leggi, il caso è più sottile e più urgente: il sistema produce qualcosa che ha la forma di una legge fisica — una formula universale, espressa in simboli matematici, che descrive una relazione tra grandezze fisiche. Ma avere la forma di una legge equivale ad averla compresa? È questa la domanda che il caso AI Feynman permette di porre con precisione filosofica che AlphaFold non raggiungeva.

C'è un secondo motivo per cui questo caso è filosoficamente privilegiato. Feynman — il fisico il cui nome il sistema porta, in omaggio al suo approccio alla comprensione fisica come capacità di derivazione multipla — aveva elaborato un criterio esplicito per la comprensione fisica: capire un fenomeno significa poterne dare almeno cinque spiegazioni diverse, derivarlo da principi diversi, vederlo da angoli concettuali distinti. Il sistema AI Feynman porta il nome di Feynman perché usa il dataset delle sue *Lectures*, ma non soddisfa il suo criterio: trova la formula senza nessuna delle sue vie

di derivazione. Questa ironia non è accidentale: è la forma precisa del paradosso della completezza applicato alla scoperta delle leggi.

5.3.2 — La struttura del problema: regressione simbolica e suoi livelli

Il problema della **regressione simbolica** è il seguente: dato un insieme di n misurazioni $\{\left(x^{(k)}, y^{(k)}\right)\}_{k=1}^{n}$ di m grandezze fisiche correlate $x^{(k)} = \left(x_1^{(k)}, ..., x_m^{(k)}\right)$ e di un target $y^{(k)}$, trovare un'espressione matematica $f: R^m \to R$ di complessità minima tale che $y^{(k)} \approx f\left(x^{(k)}\right)$ per tutti i dati. La difficoltà è che lo spazio delle espressioni simboliche è discreto, non differenziabile, e di cardinalità infinita: non si possono applicare i metodi di ottimizzazione del gradiente standard. Lo spazio di ricerca ha struttura di albero — ogni espressione è un albero sintattico i cui nodi interni sono operatori ($+$, $\times$, sin, exp, …) e le cui foglie sono variabili o costanti — e la profondità dell'albero cresce combinatorialmente con la complessità dell'espressione cercata.

Il sistema **AI Feynman** di Udrescu e Tegmark (2020, *Science Advances*) affronta questo problema con un'architettura a due fasi che combina apprendimento automatico e ricerca simbolica. Nella **prima fase**, una rete neurale apprende una rappresentazione continua della funzione target f dai dati, e viene interrogata per identificare strutture simmetriche: separabilità in somme ($f\left(x_1, x_2\right) = g_1\left(x_1\right) + g_2\left(x_2\right)$) o prodotti ($f\left(x_1, x_2\right) = g_1\left(x_1\right) \cdot g_2\left(x_2\right)$), simmetrie di scambio ($f\left(x_1, x_2\right) = f\left(x_2, x_1\right)$), dipendenze da combinazioni adimensionali di variabili (identificate attraverso l'analisi dimensionale di Buckingham). Se la rete identifica che f è separabile in prodotto di due funzioni delle variabili x_1 e $\left(x_2, x_3\right)$, il problema si riduce a due problemi separati di dimensionalità inferiore.

Nella **seconda fase**, un algoritmo di ricerca — brute-force per espressioni semplici, algoritmo evolutivo di tipo *genetic programming* per espressioni più complesse — cerca l'espressione simbolica che minimizza un criterio di tipo MDL (*Minimum Description Length*):

$$MDL(f) = MSE(f, dati) + \lambda \cdot Complessità(f),$$

dove $MSE(f, dati) = \frac{1}{n}\sum_{k}\left(y^{(k)} - f\left(x^{(k)}\right)\right)^2$ è l'errore quadratico medio e $Complessità(f)$ è la lunghezza dell'espressione simbolica (numero di nodi nell'albero sintattico). Il parametro λ bilancia fedeltà ai dati e parsimonia dell'espressione — un'istanza del principio del rasoio di Occam applicato alla scoperta simbolica.

Il sistema viene testato su 100 equazioni tratte dai *Feynman Lectures on Physics*, e riscopre correttamente la grande maggioranza: tra le più significative, la legge di gravitazione universale $F = Gm_1m_2/r^2$, la seconda legge di Newton $F = ma$, la legge di Coulomb $F = q_1q_2/\left(4\pi\epsilon_0 r^2\right)$, la relazione di de Broglie $\lambda = h/p$, l'energia relativistica $E = \gamma mc^2$, e la formula per l'energia del campo elettromagnetico $U = \frac{\epsilon_0}{2}\left(E^2 + c^2B^2\right)$. I dati di input sono sintetici — valori numerici generati dalle equazioni stesse, con eventuale rumore aggiunto — ma le equazioni riscoperte sono simbolicamente esatte.

Il risultato è sorprendente come prestazione computazionale. Ma la domanda filosoficamente rilevante è: cosa ha fatto esattamente il sistema? Per rispondere con precisione, è necessario articolare tre livelli di scoperta scientifica che il sistema tratta in modo profondamente disomogeneo.

5.3.3 — I tre livelli della scoperta: sintattico, strutturale, esplicativo

Il **primo livello** è la *rappresentazione sintattica*: dato un dataset sufficientemente denso di valori numerici della funzione f, trovare un'espressione simbolica $\hat{f}$ tale che $\|\hat{f} - f\|_\infty < \epsilon$. Il sistema AI Feynman opera a questo livello con efficacia per equazioni che hanno la struttura matematica tipica delle leggi fisiche fondamentali: prodotti e rapporti di potenze di variabili, con eventuale presenza di funzioni trigonometriche o esponenziali. Formalmente, il sistema cerca nell'insieme

$$F_K = \left\{ f = \prod_i x_i^{\alpha_i} \cdot g\left(\sum_j \beta_j x_j\right),\ \alpha_i, \beta_j \in Q,\ g \in G \right\}$$

dove G è un insieme finito di funzioni elementari (sin, cos, exp, log, $\sqrt{\cdot}$, …). La difficoltà computazionale è reale ma il problema è ben posto come ottimizzazione discreta su uno spazio strutturato.

Il **secondo livello** è la *scoperta strutturale*: identificare che i dati soddisfano una relazione con una struttura matematica specifica — separabilità, simmetria, invarianza dimensionale — prima di trovare l'espressione esplicita. Il sistema opera a questo livello in misura parziale: le fasi di preprocessing (analisi della separabilità, analisi dimensionale) costituiscono un'esplorazione sistematica di alcune strutture attese nelle leggi fisiche. Ma lo spazio di strutture che il sistema cerca è fortemente pre-specificato: le simmetrie di scambio, la separabilità additiva e moltiplicativa, e le relazioni di potenza adimensionali sono le strutture attese nelle leggi fisiche classiche. Strutture fisiche diverse — invarianza di gauge, simmetrie spezzate, relazioni non-perturbative — non sono esplorate.

Il **terzo livello** — quello che la comprensione fisica raggiunge e il sistema non raggiunge — è la *spiegazione strutturale*: rispondere alla domanda *perché* i dati soddisfano la relazione trovata. Questo terzo livello è il nucleo della distinzione tra trovare una legge e comprenderla, ed è il livello in cui il paradosso della completezza si manifesta nella sua forma più acuta nel dominio delle leggi fisiche.

5.3.4 — La profondità epistemica: il caso della legge di gravitazione

Per rendere precisa la distinzione tra i livelli, consideriamo il caso paradigmatico della legge di gravitazione universale $F = Gm_1m_2/r^2$, che il sistema AI Feynman riscopre correttamente. Il sistema ha prodotto la rappresentazione sintattica esatta della legge. Che cosa manca?

Mancano le strutture teoriche che rendono la legge *comprensibile* nel senso fisico — le derivazioni da principi distinti che la situano nella struttura più ampia della fisica. Esistono almeno quattro livelli di spiegazione strutturale per la legge di Newton, ciascuno dei quali costituisce una forma diversa di comprensione.

Derivazione dalla struttura geometrica dello spazio tridimensionale. Il potenziale gravitazionale ϕ soddisfa l'equazione di Laplace $\nabla^2\phi = 0$ in assenza di sorgenti, con sorgente puntiforme che soddisfa $\nabla^2\phi = 4\pi G\rho$. Il teorema di Gauss applicato a una superficie sferica S_r di raggio r centrata sulla sorgente dà

$$\oint_{S_r} \nabla\phi \cdot dS = 4\pi GM \Longrightarrow |\nabla\phi| = \frac{GM}{r^2}.$$

La dipendenza $1/r^2$ emerge necessariamente dalla dimensione spaziale $d = 3$ e dalla struttura della legge di Gauss: in uno spazio d -dimensionale, la legge sarebbe $F \propto 1/r^{d-1}$. La comprensione fisica della legge include la comprensione di questo legame tra la geometria dello spazio e la forma della legge di forza.

Derivazione dalla meccanica hamiltoniana e dai teoremi di conservazione. Il teorema di Noether stabilisce che a ogni simmetria continua dell'azione fisica corrisponde una grandezza conservata. Per un sistema con hamiltoniana $H = \frac{p^2}{2m} + V(r)$ dipendente solo dalla distanza (simmetria sferica), si conserva il momento angolare $L = r \times p$. La forma specifica $V(r) = -GMm/r$ si seleziona dalla condizione che il sistema ammetta orbite chiuse — per il teorema di Bertrand, le uniche forze centrali che producono orbite chiuse per tutte le condizioni iniziali sono la forza di Newton ($F \propto 1/r^2$) e la forza di Hooke ($F \propto r$). Questa è una comprensione diversa: la legge di Newton è segnata come speciale nell'insieme di tutte le possibili forze centrali per la sua proprietà topologica di produrre orbite chiuse.

Derivazione come limite non-relativistico della relatività generale. La metrica di Schwarzschild per una massa M in coordinate (t, r, θ, ϕ) è

$$ds^2 = -\left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r}\right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2.$$

Nel limite di campo debole $GM/c^2 r \ll 1$ e di velocità non-relativistiche $v \ll c$, le equazioni delle geodetiche si riducono all'equazione del moto

newtoniana $\ddot{r} = -GM\hat{r}/r^2$. La comprensione relativistica situa la legge di Newton come approssimazione di una struttura geometrica più profonda — la curvatura dello spaziotempo — e spiega perché fallisce in certi regimi (precessione del perielio di Mercurio, deflessione della luce, onde gravitazionali).

Derivazione dalla struttura dell'inversione di scala. La legge $F \propto 1/r^2$ è l'unica forma di legge di forza invariante per scala nella dimensione opportuna: se si rescala $r \to \lambda r$ e $m \to \lambda^3 \rho$ (massa proporzionale al volume), la legge di forza $F \propto Gm/r^2$ scala come $\lambda^3/\lambda^2 = \lambda$, la stessa scala dell'accelerazione $\dot{v}$. Questa invarianza non è una coincidenza: riflette la struttura della gravità come interazione a lungo raggio mediata da un campo senza massa, in contrasto con le forze nucleari brevi che hanno scala esplicita.

Il sistema AI Feynman ha la formula ma non ha accesso a nessuna di queste strutture esplicative. Non può derivare $F = Gm_1m_2/r^2$ dall'equazione di Laplace. Non può situarla nel teorema di Bertrand. Non può derivarla dalla metrica di Schwarzschild. Non può spiegarne l'invarianza di scala. Ha la sintassi della legge senza la semantica fisica che la rende comprensibile — e questa semantica è precisamente ciò che il fisico esperto possiede e che costituisce la sua comprensione della legge.

Il concetto di **profondità epistemica** di una rappresentazione formalizza questa distinzione. Si definisce la profondità epistemica di una rappresentazione R di una legge fisica L come il numero di strutture teoriche distinte che permettono di derivare L come conseguenza necessaria di principi più fondamentali, in modo tale che le strutture siano concettualmente indipendenti (non semplici riformulazioni algebriche l'una dell'altra). Il sistema AI Feynman produce rappresentazioni di profondità epistemica zero: ha la formula senza nessuna derivazione. Il fisico esperto possiede rappresentazioni di profondità epistemica ≥ 4 per le leggi fondamentali — e Feynman stesso aveva enunciato, come criterio di comprensione, la capacità di derivare un risultato fisico in almeno cinque modi distinti.

5.3.5 — Il criterio di Feynman e la sua inapplicabilità al sistema AI Feynman

Richard Feynman aveva elaborato, in diverse occasioni e in modi complementari, un criterio esplicito per la comprensione fisica. Il passaggio più noto è quello delle *Feynman Lectures on Physics* (vol. II, cap. 19): «Non capiamo nulla che non possa essere spiegato a uno studente di primo anno». Ma il criterio più sostanziale emerge nei suoi lavori sul calcolo e nella sua autobiografia intellettuale: capire un risultato fisico significa possederne almeno cinque derivazioni indipendenti — poterlo avvicinare da angoli concettuali distinti, poterlo ottenere come caso speciale di strutture più generali, poterlo derivare sia da principi locali che globali.

Questo criterio — che il Blocco II ha citato in forma sintetica nel contesto della psicologia cognitiva del fisico esperto — acquista qui una funzione argomentativa diretta: è un test operativo della comprensione fisica, un test che il sistema che porta il nome di Feynman fallisce sistematicamente.

Il test ha struttura precisa. Sia L una legge fisica e sia $D(L)$ l'insieme delle sue derivazioni da principi distinti. Il fisico comprende L se e solo se $|D(L)| \geq k$ per qualche $k \geq 5$ (il numero esatto è convenzionale ma riflette la struttura della comprensione esperta). Il sistema AI Feynman produce la formula L ma $\left|D(L)_{AI}\right| = 0$: non ha nessuna derivazione.

Più precisamente: non solo il sistema non produce derivazioni, ma non ha i concetti necessari per possedere le strutture da cui le derivazioni partono. La derivazione dalla metrica di Schwarzschild presuppone la comprensione del tensore metrico, delle equazioni di campo di Einstein, della struttura della relatività generale. La derivazione dall'equazione di Laplace presuppone la comprensione del potenziale, del teorema di Gauss, delle equazioni alle derivate parziali ellittiche. Il sistema AI Feynman non ha accesso a queste strutture: ha dati numerici e uno spazio di ricerca simbolica. La formula che trova galleggia in un vuoto concettuale — esatta sintaticamente, vuota semanticamente nel senso fisico.

Il confronto con AlphaFold illumina questa distinzione da un'angolazione diversa. AlphaFold non comprende la fisica del ripiegamento proteico — il Blocco V lo ha mostrato in dettaglio — ma la sua prestazione è su un compito in cui la «comprensione» non era necessaria per produrre previsioni corrette. Il sistema AI Feynman non comprende la fisica delle leggi che riscopre — questo paragrafo lo ha mostrato in dettaglio — ma la sua prestazione è su un compito che *sembra richiedere* comprensione: trovare una legge fisica universale. Il paradosso è che la riscoperta simbolica delle leggi è possibile senza comprensione fisica delle leggi, esattamente come la predizione strutturale delle proteine è possibile senza comprensione fisica del ripiegamento. La forma del paradosso è però diversa: nel caso di AlphaFold, la comprensione mancante riguarda un sistema specifico (questa proteina, con questa sequenza); nel caso di AI Feynman, la comprensione mancante riguarda la struttura del mondo fisico — le leggi che descrivono ogni sistema fisico del tipo considerato.

5.3.6 — Estensioni della regressione simbolica: PySR, SINDy e i limiti del paradigma

Il sistema AI Feynman è il più studiato e filosoficamente discusso, ma non è isolato nel panorama della scoperta simbolica automatica. Vale la pena descrivere il contesto più ampio per valutare se le limitazioni analizzate siano specifiche di AI Feynman o strutturali del paradigma.

PySR (Python Symbolic Regression, Miles Cranmer, 2023) è un sistema di regressione simbolica ad alta efficienza basato su algoritmi evolutivi paralleli. È progettato per scalare a dataset grandi e ad alta dimensionalità, e ha trovato applicazione nel contesto della cosmologia — in particolare per la scoperta di relazioni simboliche tra simulazioni N-body e le strutture cosmiche osservate. PySR è significativamente più efficiente di AI Feynman in termini computazionali e ha un'architettura più flessibile, ma la struttura del problema epistemico è identica: il sistema cerca espressioni simboliche che fittano i dati con complessità minima, senza accesso alle strutture teoriche che spiegherebbero le relazioni trovate.

SINDy (Sparse Identification of Nonlinear Dynamics, Brunton, Proctor, Kutz, 2016) affronta un problema diverso: data una serie temporale di misure di un sistema dinamico, identificare le equazioni differenziali che governano l'evoluzione del sistema. L'approccio è basato sulla regressione sparsa: si parametrizza la derivata temporale $\dot{x}$ come combinazione lineare sparsa di una libreria di funzioni di base $\Theta(x)$,

$\dot{x} = \Theta(x)\Xi$,

dove Ξ è una matrice sparsa di coefficienti, e si usa un algoritmo di ottimizzazione a regolarizzazione ℓ_1 (LASSO) per trovare la rappresentazione più sparsa che fitta i dati. Il metodo è stato applicato con successo a sistemi fisici come l'oscillatore di Lorenz, il pendolo, la dinamica dei fluidi, e persino all'identificazione di equazioni di campo in sistemi di plasma. Le equazioni recuperate sono fisicamente corrette e spesso di grande semplicità.

SINDy condivide con AI Feynman il medesimo limite strutturale: le equazioni differenziali trovate sono sintaticamente corrette ma epistemicamente vuote nel senso della spiegazione strutturale. Per il sistema di Lorenz $\left(\dot{x} = \sigma(y - x), \dot{y} = rx - y - xz, \dot{z} = xy - bz\right)$, SINDy può recuperare le equazioni dai dati, ma non ha accesso alla loro derivazione dalla meccanica dei fluidi (le equazioni di Navier-Stokes nel limite di convezione), né all'analisi della biforcazione che mostra quando il sistema transisce da un punto fisso a un attrattore caotico, né alla struttura geometrica dell'attrattore strano.

Il paradigma generale della regressione simbolica ha dunque limiti strutturali — non accidentali — che emergono chiaramente dall'analisi di questi casi. Questi limiti possono essere articolati in quattro asimmetrie sistematiche rispetto alla comprensione fisica.

5.3.7 — Le asimmetrie strutturali tra scoperta simbolica e comprensione fisica

Prima asimmetria: sintassi senza semantica. Il sistema trova l'espressione simbolica della legge ma non ha il sistema di significati

— la rete concettuale — in cui la legge è situata per il fisico. La legge $F = Gm_1m_2/r^2$ è, per il fisico, un nodo in una rete semantica ricca: è connessa al concetto di campo gravitazionale, al problema dei tre corpi, alla formazione stellare, alla dinamica galattica, alla curvatura dello spaziotempo. Per il sistema AI Feynman, è un'espressione algebrica che minimizza il MDL su un dato dataset. La stessa stringa di simboli ha contenuto semantico radicalmente diverso per i due.

Seconda asimmetria: ricerca senza comprensione delle condizioni di applicabilità. Il fisico che comprende la legge di Newton sa anche quando essa non si applica: vicino a masse molto grandi (relatività generale), a velocità relativistiche (teoria dei campi), a scale subatomiche (meccanica quantistica). Sa identificare i segnali di violazione della legge — la precessione del perielio di Mercurio, la deflessione della luce, l'allargamento spettrale gravitazionale — e sa quale struttura teorica le spiega. Il sistema AI Feynman non ha accesso a questo metaknowledge: produce la formula e non ha modo di articolare le sue condizioni di applicabilità. Se addestrato su dati che includono piccole deviazioni dalla legge newtoniana, il sistema tenterà di fittare anche le deviazioni con una formula più complessa, senza la comprensione che le deviazioni segnalano una teoria più profonda.

Terza asimmetria: riscoperta senza capacità di congettura genuina. Il benchmark su cui AI Feynman è testato è significativamente più facile del problema della vera scoperta scientifica: le equazioni del dataset dei *Feynman Lectures* sono note, e il sistema deve ritrova espressioni che i fisici hanno già trovato. La vera scoperta scientifica — come quella di Newton, di Maxwell, di Einstein — comporta il passare da fenomeni incompresi a strutture teoriche nuove. Non è noto nessun caso in cui un sistema di regressione simbolica abbia prodotto una genuina scoperta di leggi fisiche non già note. Il limite non è accidentale: la regressione simbolica cerca nello spazio delle espressioni algebriche, non nello spazio delle strutture teoriche. Una scoperta come quella di Maxwell — l'aggiunta del termine di corrente di spostamento all'equazione di Ampère per garantire la consistenza della conservazione della carica, con la conseguenza

della predizione delle onde elettromagnetiche — non è il tipo di scoperta che emerge dalla regressione simbolica su dati di correnti e campi.

Quarta asimmetria: formula senza struttura causale. La comprensione fisica include la comprensione delle relazioni causali tra grandezze fisiche. Per la legge di Newton $F = Gm_1m_2/r^2$, la struttura causale è: la massa m_1 è la sorgente del campo gravitazionale, il campo esercita una forza sulla massa m_2 proporzionale a m_2, la forza scala come $1/r^2$ per la struttura geometrica dello spazio. Il sistema AI Feynman trova la relazione funzionale tra le variabili ma non ha accesso alla direzione causale: la formula $F = Gm_1m_2/r^2$ è simmetrica nello scambio di m_1 e m_2 (la forza è uguale e contraria), ma la struttura causale — quale massa è sorgente e quale è soggetto — non emerge dalla formula simmetrica. Per il fisico, la distinzione tra sorgente e soggetto della forza gravitazionale è concettualmente fondamentale anche quando la legge è simmetrica.

5.3.8 — La connessione con la tesi: la forma più acuta del paradosso della completezza

L'analisi del sistema AI Feynman e delle sue estensioni permette di formulare la connessione con la tesi della monografia nella sua forma più precisa.

Il paradosso della completezza — come il Blocco IV lo ha formulato — è che il formalismo della meccanica quantistica è predittivamente completo e interpretativamiente aperto: produce previsioni corrette per qualsiasi esperimento senza determinare quale struttura del mondo fisico descriva. La forma che questo paradosso assume nel dominio della scoperta simbolica è più acuta ancora: non solo le previsioni (i valori numerici della forza gravitazionale) sono corrette, ma anche la *rappresentazione simbolica* (la formula $F = Gm_1m_2/r^2$) è esatta. Il sistema AI Feynman ha qualcosa di più di AlphaFold: non solo numeri corretti, ma simboli corretti. Eppure la comprensione

fisica — la rete di strutture teoriche, causali, esplicative che situano la formula nel corpo della fisica — è assente.

Questo è il motivo per cui il caso AI Feynman è argomentativamiente più urgente di AlphaFold per la tesi della monografia. AlphaFold dimostra che è possibile predire strutture fisiche senza comprendere la fisica del ripiegamento. AI Feynman dimostra che è possibile *trovare le leggi fisiche stesse* senza comprenderle. La dissociazione tra formalismo e comprensione — che per la meccanica quantistica si manifestava al livello delle interpretazioni ontologiche — si manifesta qui al livello della stessa struttura simbolica delle leggi. La formula è disponibile, i simboli sono corretti, la struttura algebrica è giusta. Ma il fisico che comprende la legge possiede qualcosa che la formula non contiene: la rete di significati che la rende leggibile come legge della natura — come una struttura del mondo fisico che il formalismo cattura.

La **lettura della natura** — nel senso del titolo di questa monografia — non è la produzione di una stringa di simboli che descrive correttamente un fenomeno fisico. È la costruzione di un modello fisicamente abitato del mondo in cui quella stringa trova il suo significato. Il sistema AI Feynman produce la stringa. Non abita il modello.

Riferimenti principali per §5.3: Udrescu e Tegmark (2020), «AI Feynman: A Physics-Inspired Method for Symbolic Regression», *Science Advances*; Udrescu, Tan, Feng, Neto, Wu e Tegmark (2020), «AI Feynman 2.0: Pareto-Optimal Equations for Scientific Discovery», *NeurIPS*; Brunton, Proctor e Kutz (2016), «Discovering Governing Equations from Data by Sparse Identification of Nonlinear Dynamical Systems», *PNAS*; Cranmer (2023), «Interpretable Machine Learning for Physics», *arXiv*; Schmidt e Lipson (2009), «Distilling Free-Form Natural Laws from Experimental Data», *Science*; Feynman, Leighton e Sands (1964), *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley; Bertrand (1873), «Théorème relatif au mouvement d'un point attiré vers un centre

fixe», *Comptes rendus de l'Académie des Sciences*; Lorenz (1963), «Deterministic Nonperiodic Flow», *Journal of the Atmospheric Sciences*; Norton (2003), «A Material Theory of Induction», *Philosophy of Science*; Woodward (2003), *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation*, Oxford University Press.

§ 5.4 — Reti neurali per la meccanica quantistica: potenziali di interazione appresi

Oltre ad AlphaFold e alla scoperta simbolica, esiste un terzo filone di intelligenza artificiale in fisica che il Blocco V deve analizzare: l'apprendimento di **potenziali di interazione neurali** per la simulazione di sistemi quantistici. Questo caso è il più vicino al cuore del problema della meccanica quantistica, e il più rilevante per il paradosso della completezza del Blocco IV, perché qui i sistemi artificiali entrano direttamente nel dominio in cui il formalismo è formalmente completo ma l'interpretazione rimane aperta.

Il problema della struttura elettronica — determinare l'energia dello stato fondamentale di sistemi di elettroni in un campo di nuclei fissi — è un problema di meccanica quantistica a molti corpi. L'hamiltoniana esatta (nella cosiddetta approssimazione di Born-Oppenheimer, in cui i nuclei sono trattati come sorgenti di potenziale esterno) è

$$\hat{H} = -\sum_i \frac{\hbar^2}{2m_e}\nabla_i^2 - \sum_{i,I}\frac{Z_I e^2}{|r_i - R_I|} + \sum_{i<j}\frac{e^2}{|r_i - r_j|} + \sum_{I<J}\frac{Z_I Z_J e^2}{|R_I - R_J|},$$

dove gli indici i, j corrono sugli elettroni e I, J sui nuclei, r_i sono le posizioni degli elettroni, R_I le posizioni dei nuclei, e Z_I i numeri atomici. La soluzione esatta — la funzione d'onda elettronica $\Psi(r_1, \ldots, r_N)$ — vive in uno spazio di Hilbert $L^2(R^{3N})$ di dimensione $3N$, e cresce esponenzialmente con il numero N di elettroni: il calcolo esatto è intrattabile per $N \gtrsim 30$.

I metodi approssimati sviluppano approssimazioni controllate. Hartree-Fock (HF) approssima la funzione d'onda come un singolo determinante di Slater

$$\Psi^{HF}\left(r_1, \ldots, r_N\right) = \frac{1}{\sqrt{N!}} det\left[\phi_i\left(r_j\right)\right]_{i,j=1}^{N},$$

ottimizzando gli spinorbitali ϕ_i attraverso le equazioni di Fock. HF cattura circa il 99% dell'energia totale ma manca della **correlazione elettronica** — l'effetto delle correlazioni quantistiche tra gli elettroni che non sono catturate dal campo medio. La teoria del funzionale della densità (DFT) sfrutta il teorema di Hohenberg-Kohn — che garantisce l'esistenza di un funzionale dell'energia $E[\rho]$ della densità elettronica $\rho(r)$ il cui minimo fornisce l'energia esatta dello stato fondamentale — e approssima il termine di scambio-correlazione

$$E[\rho] = T_s[\rho] + E_H[\rho] + E_{xc}[\rho] + V_{ext}[\rho],$$

dove T_s è l'energia cinetica del sistema di Kohn-Sham di elettroni non interagenti, E_H è il termine di Hartree, E_{xc} il funzionale di scambio-correlazione e V_{ext} il potenziale esterno. Il funzionale E_{xc} non è noto esattamente, e le diverse approssimazioni — LDA, GGA, funzionali ibridi come B3LYP — costituiscono la gerarchia Jakob's Ladder della DFT.

I sistemi di apprendimento automatico come **SchNet** (Schütt et al., 2017), **PaiNN** e **NequIP** apprendono potenziali di interazione neurali $V_\theta: R^{3N_{atoms}} \to R$: reti neurali che, addestrate su calcoli quantistici accurati (tipicamente CCSD(T) o DFT con funzionali di alta qualità) per configurazioni molecolari campionate, apprendono la mappatura dalla configurazione atomica $\{R_I\}$ all'energia potenziale $E\left(\{R_I\}\right)$ e alle forze $F_I = -\nabla_{R_I} V_\theta$. Una volta addestrato, il potenziale neurale può essere usato in simulazioni dinamiche a costo computazionale di gran lunga inferiore ai calcoli quantistici di riferimento — $O\left(N_{atoms}\right)$ invece di $O\left(N_{atoms}^3\right)$ per DFT — mantenendo un'accuratezza vicina a quella del metodo di riferimento.

PaiNN e NequIP sono progettati per rispettare le simmetrie fisiche del problema. L'energia è uno **scalare** rispetto alle rototraslazioni: se si ruota e trasla la configurazione atomica, l'energia non cambia. Le

forze sono **vettori** equivarianti: si trasformano come vettori quando si ruota la configurazione. Formalmente, si richiede che per ogni rototraslazione $g = (R, t) \in SE(3)$,

$$V_\theta\left(\{RR_I + t\}\right) = V_\theta\left(\{R_I\}\right), \qquad F_I\left(g \cdot \{R_J\}\right) = R\,F_I\left(\{R_J\}\right).$$

NequIP realizza questa equivarianza usando funzioni d'onda sferiche $Y_l^m\left(\hat{r}\right)$ come base per le rappresentazioni intermede, che si trasformano secondo le rappresentazioni irriducibili $D^l(R)$ del gruppo di rotazioni $SO(3)$. L'aggiornamento delle feature di ogni atomo i al livello $k + 1$ è

$$h_i^{(k+1)} = \sum_{j \in N(i)} f_\theta^{(k)}\left(\| r_{ij} \|\right) \otimes_{CG} h_j^{(k)},$$

dove $N(i)$ è il vicinato dell'atomo i, $f_\theta^{(k)}$ è una funzione radiale appresa, e $\otimes_{CG}$ denota il prodotto tensoriale di Clebsch-Gordan che garantisce l'equivarianza della rappresentazione risultante rispetto alle rotazioni.

Il punto cruciale per l'argomento del Blocco V è questo: l'equivarianza rispetto a $SE(3)$ non è appresa dai dati — è incorporata nell'architettura dalla progettazione umana. Il fisico che ha progettato NequIP sapeva che l'energia è uno scalare e le forze sono vettori, sapeva che il sistema fisico ha simmetria di rotazione e riflessione, e ha incorporato questa conoscenza nella struttura matematica della rete. La rete non ha scoperto che l'energia è uno scalare: ha ricevuto questa conoscenza come vincolo strutturale dal fisico che la comprende.

Più recentemente, la **FermiNet** (Pfau et al., 2020) e le **Neural Network Quantum States** (NNQS) di Carleo e Troyer hanno esteso questo approccio alla soluzione diretta dell'equazione di Schrödinger. La funzione d'onda Ψ viene parametrizzata come rete neurale

$$\Psi_\theta\left(r_1, \ldots, r_N\right) = det\left[F_{\theta,k}\left(r_1, \ldots, r_N\right)\right]_{k=1}^{K} \cdot e^{J_\theta\left(r_1, \ldots, r_N\right)},$$

dove il prodotto di determinanti incorpora esplicitamente l'antisimmetria fermionistica richiesta dal principio di esclusione di Pauli, e J_θ è un fattore di Jastrow che cattura la correlazione a breve distanza. I parametri θ vengono ottimizzati attraverso il metodo **Variational Monte Carlo** (VMC): si minimizza il valore atteso dell'energia

$$E_\theta = \frac{\langle \Psi_\theta | \hat{H} | \Psi_\theta \rangle}{\langle \Psi_\theta | \Psi_\theta \rangle} = \int \left| \Psi_\theta(r) \right|^2 E_L(r)\, dr,$$

dove $E_L(r) = \frac{\hat{H}\Psi_\theta(r)}{\Psi_\theta(r)}$ è l'**energia locale**, attraverso campionamento Monte Carlo della distribuzione di probabilità $\left|\Psi_\theta(r)\right|^2$ e discesa del gradiente stocastica. Per il principio variazionale di Rayleigh-Ritz, $E_\theta \geq E_0$ per ogni Ψ_θ, con uguaglianza se e solo se $\Psi_\theta = \Psi_0$ — la funzione d'onda esatta dello stato fondamentale. FermiNet raggiunge le soluzioni più accurate disponibili per molecole di piccole dimensioni, superando anche i metodi coupled cluster di riferimento in alcuni casi.

In tutti questi sistemi, la struttura del contributo fisico e del contributo computazionale è la stessa: il fisico porta la struttura — le simmetrie, l'antisimmetria fermionistica, la forma funzionale appropriata della funzione d'onda, il principio variazionale — e la rete ottimizza i parametri nei dati. La divisione del lavoro non è uniforme: la comprensione fisica è interamente dal lato umano, il calcolo è interamente dal lato della rete. Non esiste nessun sistema attuale che apprenda le simmetrie fisiche rilevanti dai dati senza che siano incorporate dall'esterno — e questo non è un'insufficienza contingente ma una difficoltà strutturale, perché le simmetrie fisiche sono principi che si *comprendono*, non pattern che si apprende a riconoscere.

---

§ 5.5 — Il Nobel 2024 e le sue implicazioni epistemologiche

Il Premio Nobel per la Fisica 2024 è stato assegnato a John Hopfield e Geoffrey Hinton per il loro contributo alle reti neurali artificiali e

all'apprendimento automatico — un Nobel per la fisica che ha premiato contributi a strumenti computazionali, non a risultati sulla struttura della materia. Il Premio Nobel per la Chimica 2024 è stato assegnato a David Baker, Demis Hassabis e John Jumper per la predizione computazionale della struttura proteica, includendo esplicitamente il contributo di AlphaFold2. Entrambi i premi hanno suscitato discussioni nella comunità scientifica che vanno al di là delle questioni procedurali sull'assegnazione, e che toccano direttamente la tesi del Blocco V.

5.5.1 — La questione epistemologica del Nobel per la Fisica 2024

La discussione epistemologicamente rilevante è questa: i premi del 2024 implicano, almeno dal punto di vista dell'Accademia svedese, che contribuire a strumenti computazionali che accelerano la scoperta scientifica è equivalente — o almeno comparabile — a contribuire alla comprensione della struttura della materia. Questa valutazione non è unanime. Molti fisici hanno osservato che Hopfield e Hinton hanno contribuito a strumenti potenti, non a comprensione della struttura della materia nel senso in cui lo sono stati i Nobel per la fisica magnetica, la scoperta dei quasar, o la fisica delle particelle. La distinzione tra contributo allo strumento e contributo alla comprensione è precisamente quella che il Blocco V ha cercato di articolare.

Vale la pena precisare la struttura della critica, che non è una negazione del valore dei contributi premiati ma un'interrogazione sulla categoria epistemologica in cui cadono. Hopfield (1982) ha introdotto le **reti di Hopfield**, sistemi dinamici con hamiltoniana

$$E(s) = -\frac{1}{2}\sum_{i \neq j} w_{ij} s_i s_j - \sum_i \theta_i s_i,$$

dove $s_i \in \{-1, +1\}$ sono gli spin, w_{ij} le connessioni sinaptiche e θ_i i bias, e ha dimostrato che i minima locali dell'energia corrispondono ai pattern memorizzati dalla rete. Il risultato ha un'ispirazione chiaramente fisica (modelli di spin-vetro di Edwards e Anderson), e il suo contributo alla fisica della materia condensata come modello di memoria associativa è autentico. Hinton (con Rumelhart e Williams,

1986) ha sviluppato la retropropagazione del gradiente per addestrare reti multistrato — un contributo algoritmico cruciale per l'apprendimento automatico moderno, senza applicazione diretta alla comprensione della struttura della materia.

L'ispirazione fisica del modello di Hopfield non implica che il risultato sia un contributo alla comprensione della fisica: è un contributo che *usa* la fisica (il formalismo dei sistemi di spin) per costruire un modello di sistema artificiale. La stessa distinzione vale nel senso inverso: i contributi di AlphaFold2 al Nobel per la Chimica usano la biologia strutturale come dominio di applicazione, ma la comprensione biofisica del ripiegamento non è il risultato del contributo. La categoria «contributi alla comprensione della struttura della natura» e la categoria «contributi a strumenti che accelerano la ricerca» si sovrappongono raramente; il Nobel 2024 si è collocato nell'intersezione in modo che l'Accademia non ha ritenuto necessario giustificare esplicitamente, lasciando la giustificazione implicita nel valore pratico dei risultati.

5.5.2 — La capacità euristica come criterio di valutazione

Un modo formale di rendere questa distinzione precisa è attraverso la nozione di **capacità euristica** di uno strumento. Uno strumento ha capacità euristica alta rispetto a una teoria T se il suo utilizzo porta con alta probabilità alla formulazione di nuove ipotesi testabili all'interno di T, che estendono la comprensione del dominio descritto da T. Formalmente, se $H_T(t)$ indica il numero cumulato di ipotesi feconde generate attraverso l'uso dello strumento entro il tempo t, uno strumento con alta capacità euristica produce $\dot{H}_T(t) > 0$ in modo sostenuto, con le ipotesi generate strutturalmente connesse alla teoria T e non solo ai dati prodotti dallo strumento.

La cristallografia a raggi X ha altissima capacità euristica rispetto alla biofisica strutturale: le strutture che rivela hanno storicamente guidato la formulazione di ipotesi sui meccanismi biochimici — la struttura a doppia elica del DNA di Watson e Crick (1953), la struttura attiva degli enzimi che ha fondato l'enzimologia strutturale, la geometria dei recettori che ha guidato la farmacologia molecolare.

In tutti questi casi, la struttura cristallografica ha suggerito non solo il *cosa* (la forma tridimensionale della molecola) ma il *perché* (il meccanismo di funzionamento biologico implicato dalla struttura). È questa connessione struttura-meccanismo che costituisce la capacità euristica alta.

Il caso di AlphaFold2 è più complesso. Dei 200 milioni di strutture proteiche predette nel database AFDB, una frazione — difficile da quantificare con precisione, ma documentata in letteratura — ha già generato ipotesi biologiche feconde: la struttura di proteine orfane associate a malattie ha guidato la progettazione razionale di inibitori; la struttura di proteine di organismi estremofilici ha generato ipotesi sull'adattamento molecolare all'alta temperatura; le strutture di proteine virali hanno accelerato la progettazione di farmaci antivirali. Queste applicazioni suggeriscono che $\dot{H}_T(t) > 0$, ovvero che AlphaFold2 ha capacità euristica non nulla. La misura in cui questa capacità è *strutturalmente* connessa alla biofisica del ripiegamento — se le ipotesi generate riguardano il *meccanismo* del ripiegamento o solo le proprietà delle strutture predette — rimane aperta e costituisce il terreno su cui il giudizio epistemologico sui Nobel del 2024 sarà retroattivamente costruito dalla pratica scientifica degli anni successivi.

5.5.3 — La posizione di Hassabis e la questione del potenziamento

Demis Hassabis, in conversazioni successive all'assegnazione del Nobel, ha sostenuto che AlphaFold2 non sostituisce la comprensione biofisica del ripiegamento ma la *potenzia*: rende disponibili strutture che i biologi possono studiare per costruire comprensione. Questa posizione è convincente nella misura in cui la struttura predetta è il dato di partenza per l'analisi biofisica umana — come la struttura cristallografica è il dato di partenza, non la comprensione stessa. È meno convincente se si usa AlphaFold2 come oracolo che risponde alla domanda sulla struttura senza che nessun biofisico costruisca comprensione della risposta.

La distinzione tra i due usi non è tecnica ma epistemica: nel primo caso, il sistema artificiale amplifica la capacità del fisico di costruire

comprensione attraverso l'interazione con dati strutturali nuovi; nel secondo caso, sostituisce la costruzione di comprensione con la produzione di risposte corrette. La stessa struttura si riproduce nei casi di AI Feynman (§ 5.3) e FermiNet (§ 5.4): la distinzione tra potenziamento e sostituzione della comprensione non è determinata dall'architettura del sistema artificiale ma dall'uso che la pratica scientifica ne fa. Un AI Feynman che restituisce leggi fisiche su cui il fisico costruisce ipotesi causali è epistemicamente diverso da un AI Feynman che restituisce leggi fisiche usate come black-box in pipeline automatizzate. La riflessione che i Nobel del 2024 impongono alla comunità della fisica non riguarda la validità dei contributi premiati: riguarda la struttura epistemica delle pratiche scientifiche che quegli strumenti stanno generando.

---

§ 5.6 — La struttura del contributo artificiale: cinque asimmetrie sistematiche

Il Blocco V si chiude identificando cinque asimmetrie sistematiche tra il contributo dei sistemi artificiali e la comprensione fisica umana nella fisica contemporanea. Queste asimmetrie non sono contingenti — non dipendono dall'insufficienza tecnica degli strumenti attuali — ma strutturali: emergono dalla natura del problema di apprendimento che i sistemi affrontano, e non sarebbero eliminate da miglioramenti nell'architettura, nella quantità di dati, o nella potenza computazionale.

La **prima asimmetria** riguarda le simmetrie fisiche. I sistemi artificiali più accurati in fisica — NequIP, FermiNet, PaiNN — incorporano le simmetrie fisiche rilevanti nell'architettura piuttosto che apprenderle dai dati. Apprenderle dai dati richiederebbe, per la simmetria di rotazione $SO(3)$, un numero di esempi proporzionale alla dimensione della rappresentazione irriducibile di $SO(3)$ che cattura il pattern fisico — e per le simmetrie di gauge della teoria di campo quantistica, un campionamento dello spazio delle orbite sotto il gruppo di gauge che non è computazionalmente trattabile. Le simmetrie fisiche sono principi di comprensione che il fisico porta al

sistema; il sistema non le può estrarre dai dati senza una struttura portata dall'esterno.

La **seconda asimmetria** riguarda la causalità. I sistemi artificiali apprendono correlazioni statistiche $P(y|x)$ tra configurazioni e proprietà fisiche; non apprendono relazioni causali $P(y|do(x))$ nel senso di Pearl. La distinzione non è tecnica: le correlazioni sono accessibili nei dati, le relazioni causali richiedono una struttura di intervento — il modello del meccanismo fisico che produce l'effetto — che i dati passivi non contengono. Il fisico che ha capito la teoria del funnel energetico sa che la struttura proteica nativa è causata dalla minimizzazione dell'energia libera su un paesaggio a funnel, e può intervenire su questa struttura causale (modificando la sequenza per ingegnerizzare il paesaggio). AlphaFold2, che ha appreso la correlazione statistica tra sequenza e struttura, non ha accesso alla struttura causale e non può intervenire su di essa nel senso fisico.

La **terza asimmetria** riguarda la generalizzazione *out-of-distribution*. I sistemi artificiali generalizzano attraverso interpolazione statistica all'interno della distribuzione dei dati di addestramento; i principi fisici generalizzano attraverso struttura in senso logico. Formalmente: sia D la distribuzione dei dati di addestramento, e sia D' una distribuzione diversa. Un sistema addestrato su D produce previsioni con errore $\epsilon_{D'}$ su D' che può essere arbitrariamente grande se D' e D sono statisticamente distanti. Un fisico che conosce il principio P (ad es., la legge di Gauss) produce previsioni corrette su qualsiasi distribuzione D' per cui P è applicabile, indipendentemente dalla distanza statistica da D. Questa differenza non è colmabile con più dati: dipende dalla natura logica del principio, che si generalizza senza richiedere esempi nella nuova distribuzione.

La **quarta asimmetria** riguarda la trasparenza. La comprensione fisica è, almeno in linea di principio, *articolabile*: il fisico che capisce la meccanica di Bohm può spiegarne la struttura, identificare le sue condizioni di applicabilità e le sue limitazioni, costruire esempi che ne illustrano le conseguenze non ovvie. Le reti neurali profonde — e in particolare AlphaFold2, NequIP, FermiNet — sono opache: producono previsioni corrette attraverso catene di attivazioni che non

si lasciano interpretare in termini di ragionamento fisico. Il programma della **interpretabilità** (*explainability*) tenta di estrarre struttura comprensibile dai pesi della rete: attraverso l'analisi dell'attenzione, la proiezione in spazi latenti ridotti, l'identificazione di pattern nei vettori intermedi. I risultati sono parziali e non equivalenti a una spiegazione fisica. Identificare che il livello 24 dell'Evoformer ha una testa di attenzione che corrisponde approssimativamente alle coppie di residui co-evoluti non è equivalente a comprendere perché la co-evoluzione predice il contatto strutturale.

La **quinta asimmetria** — la più fondamentale — riguarda l'**abitazione**. La comprensione fisica, come il Blocco II ha documentato attraverso gli studi di Chi, Larkin, Simon e de Groot, non è separabile dall'agente che la possiede: è una struttura cognitiva costruita attraverso anni di interazione fisica con il dominio, che include una dimensione percettiva (il fisico *vede* strutture fisiche), una dimensione motoria (il fisico *simula mentalmente* dinamiche fisiche), e una dimensione tacita (il fisico sa riconoscere la fisica giusta prima di calcolarla, nel senso di Polanyi). Formalmente, se A è un agente fisico con stato cognitivo $\sigma(A)$ e D è un dominio fisico, la comprensione fisica di A rispetto a D è una relazione $C(A, D)$ che include:

$$C(A, D) \exists \{ struttura\ percettiva\ di\ D\ in\ \sigma(A)\ modello\ causale di\ D\ in\ \sigma(A)\ sapere\ tacito\ di\ D$$

Un sistema artificiale S che elabora dati fisici ha, al più, la struttura associativa $P(y|x)$ — una relazione statistica tra rappresentazioni numeriche. La relazione $C(S, D)$ non è definita nel senso rilevante perché S non è un agente situato fisicamente in D: non ha un corpo che si muove nello spazio fisico tridimensionale, non ha mai sperimentato la caduta gravitazionale che rende intuitiva l'accelerazione g, non ha mai osservato un'interferenza su uno schermo che renda percettivamente reale la sovrapposizione quantistica. Questa mancanza di situatezza fisica non è un'insufficienza tecnica eliminabile con architetture più sofisticate: è una differenza ontologica tra il tipo di agente che comprende fisicamente e il tipo di sistema che elabora dati fisici.

Le cinque asimmetrie convergono verso un'unica conclusione, che il Blocco VI svilupperà nella sua forma più articolata: i sistemi artificiali in fisica eccellono nella prestazione predittiva senza acquisire la comprensione che orienta, guida e spiega quella prestazione. Questa dissociazione tra prestazione e comprensione non è un fatto contingente dello sviluppo tecnologico: è la manifestazione specifica, nel dominio dell'intelligenza artificiale applicata alla fisica, del paradosso della completezza che il Blocco IV ha formulato a partire dalla struttura della meccanica quantistica. Un formalismo può essere predittivamente completo — e un sistema artificiale addestrato su di esso può raggiungere la precisione del formalismo — senza che questa completezza predittiva implichi comprensione della struttura fisica descritta.

---

§ 5.7 — Prestazione e comprensione: una mappa formale

Prima di passare al Blocco VI, è utile costruire una mappa formale della distinzione tra prestazione e comprensione che i paragrafi precedenti hanno articolato in termini qualitativi. La mappa non è esaustiva, ma fornisce una struttura che le sezioni conclusive dell'opera potranno utilizzare con precisione.

5.7.1 — La definizione di sistema cognitivo fisico e di prestazione predittiva

Si definisce un **sistema cognitivo fisico** $C = (A, D, R)$ come una tripla in cui A è un agente (umano o artificiale), D è un dominio fisico e R è l'insieme delle rappresentazioni che A possiede di D. La **prestazione predittiva** di C si misura attraverso la funzione

$$\Pi(C) = sup_{task \in T(D)} Accuracy(A, task),$$

dove $T(D)$ è l'insieme dei task predittivi definibili su D e Accuracy misura la qualità delle previsioni di A rispetto al task nel senso della distribuzione dei dati di test. AlphaFold2 raggiunge $\Pi(C)$ prossima all'ottimo per il task del ripiegamento proteico nel regime coperto

dal Protein Data Bank; AI Feynman raggiunge $\Pi(C)$ prossima all'ottimo per la regressione simbolica delle leggi del benchmark di Feynman; FermiNet raggiunge $\Pi(C)$ prossima all'ottimo variazionale per le energie fondamentali dei sistemi elettronici trattati. In tutti e tre i casi, $\Pi(C)$ è comparabile o superiore a quella raggiungibile dai migliori esperti umani.

5.7.2 — Il vettore di comprensione e le sue componenti

La **comprensione** di C non è misurabile con una singola grandezza scalare: richiede un vettore di componenti distinte, ciascuna delle quali corrisponde a una delle asimmetrie identificate nel § 5.6 e a una componente della lettura della natura che il Blocco VI articolerà compiutamente.

$$U(C) = \left(U_{perc},\ U_{caus},\ U_{struct},\ U_{ontic}\right) \in [0,1]^4,$$

dove le quattro componenti hanno il significato seguente:

- $U_{perc} \in [0,1]$ misura la comprensione **percettiva**: la capacità dell'agente di costruire un modello percettivamente accessibile del dominio — di *vedere* strutture fisiche, di anticipare comportamenti attraverso simulazione mentale, di riconoscere pattern fisici rilevanti prima del calcolo. Per un fisico esperto in meccanica classica, $U_{perc} \approx 1$; per un fisico esperto in meccanica quantistica, U_{perc} è significativamente ridotta e dominio-dipendente; per AlphaFold2, $U_{perc} \approx 0$.
- $U_{caus} \in [0,1]$ misura la comprensione **causale**: la capacità dell'agente di possedere un modello del meccanismo fisico che produce le previsioni, nel senso di Pearl — di distinguere $P(y|x)$ da $P(y|do(x))$, di identificare le variabili di intervento, di prevedere gli effetti di perturbazioni non contenute nella distribuzione dei dati. Per un fisico che comprende la teoria del funnel energetico del ripiegamento, $U_{caus} > 0$ e orienta la progettazione di esperimenti di perturbazione; per AlphaFold2, $U_{caus} \approx 0$.

- $U_{struct} \in [0,1]$ misura la comprensione **strutturale**: la capacità dell'agente di possedere le simmetrie, i vincoli, i principi di conservazione e la struttura teorica profonda del dominio — ciò che il criterio di Feynman cattura come vie d'accesso multiple alla stessa legge. Per un fisico esperto, $U_{struct} \approx 1$; per FermiNet, $U_{struct} > 0$ in modo parziale (il principio di antisimmetria è incorporato nell'architettura), ma $U_{struct} \ll 1$ per le strutture teoriche più profonde; per AI Feynman, $U_{struct} \approx 0$.
- $U_{ontic} \in [0,1]$ misura la comprensione **ontologica**: la capacità dell'agente di possedere un modello dell'entità fisica descritta dal formalismo — di abitare il dominio nel senso in cui il fisico classico abita lo spazio delle fasi, con l'interpretazione fisica degli oggetti formali. In meccanica quantistica, $U_{ontic} < 1$ anche per i fisici esperti, per ragioni strutturali legate alla proliferazione delle interpretazioni; per tutti i sistemi artificiali analizzati, $U_{ontic} \approx 0$.

5.7.3 — Il paradosso della prestazione e la sua struttura

Il **paradosso della prestazione** che il Blocco V ha documentato si enuncia ora formalmente come la constatazione che, per i sistemi artificiali analizzati, $\Pi(C)$ e $\| U(C) \|$ — la norma euclidea del vettore di comprensione — sono asintoticamente indipendenti: si può avere Π arbitrariamente alta con $\| U \|$ arbitrariamente bassa. Più precisamente, la struttura osservata è:

$$\Pi\left(C_{AI}\right) \gtrsim \Pi\left(C_{exp}\right) \quad mentre \quad \|U\left(C_{AI}\right)\| \ll \|U\left(C_{exp}\right)\|,$$

dove C_{AI} è il sistema artificiale e C_{exp} è l'esperto umano. Questa relazione non vale solo asintoticamente come limite teorico: è già documentata empiricamente nei casi di AlphaFold2, AI Feynman e FermiNet analizzati nelle sezioni precedenti.

Questa indipendenza non vale per i sistemi cognitivi fisici umani, in cui la comprensione è il prerequisito e la guida della prestazione. Il

fisico esperto raggiunge alta prestazione perché possiede alta comprensione: senza $U_{struct} \approx 1$, il fisico non sa quale legge cercare tra le infinite possibili; senza $U_{caus} > 0$, non sa quale esperimento progettare per testare la legge trovata; senza $U_{perc} > 0$, non sa riconoscere il segnale fisico nel rumore dei dati. La dissociazione Π alta / $\| U \|$ bassa è accessibile ai sistemi artificiali proprio perché questi non hanno bisogno di costruire comprensione per raggiungere prestazione: possono ottimizzare Π direttamente, attraverso la minimizzazione dell'errore empirico su dati di addestramento, senza passare attraverso la struttura cognitiva che per l'esperto umano è il percorso obbligato verso la prestazione.

Il punto più sottile — e il più rilevante per la tesi del Blocco VI — è che questa dissociazione ha un costo epistemico che non emerge dalla misura di Π. Un sistema artificiale con $\Pi \approx 1$ e $\| U \| \approx 0$ produce previsioni corrette nel dominio di addestramento ma non può orientare la ricerca in modo produttivo, non può identificare i casi in cui la legge appresa non si generalizza, non può formulare ipotesi su strutture fisiche non contenute nei dati. La fisica dell'intelligenza artificiale ha prodotto sistemi che si trovano in una regione dello spazio $(\Pi, \|U\|)$ che il pensiero fisico tradizionale non aveva concepito come accessibile: alta prestazione, bassa comprensione. Che questa regione sia epistemicamente coerente — che la prestazione senza comprensione sia davvero conoscenza nel senso fisico, o solo un surrogato di essa — è la domanda che il Blocco VI affronterà nella sua forma più articolata.

$$U(C) = \left(U_{perc}, U_{caus}, U_{struct}, U_{ontic}\right) \in [0,1]^4,$$

dove U_{perc} è la comprensione percettiva, U_{caus} quella causale, U_{struct} quella strutturale e U_{ontic} quella ontologica. Per un fisico esperto nel dominio D, tutte e quattro le componenti sono positive e significative; per AlphaFold2 applicato al ripiegamento proteico, $U_{perc} \approx 0$, $U_{caus} \approx 0$, $U_{struct} > 0$ (per via delle simmetrie incorporate), $U_{ontic} \approx 0$.

Il **paradosso della prestazione** che il Blocco V ha documentato è che $\Pi(C)$ e $U(C)$ sono asintoticamente indipendenti per i sistemi artificiali: si può avere Π arbitrariamente alta con U arbitrariamente bassa. Questa indipendenza non vale per i sistemi cognitivi fisici umani, in cui la comprensione è il prerequisito e la guida della prestazione, e le due non possono essere dissociate senza perdita di generalizzabilità. La fisica dell'intelligenza artificiale ha prodotto sistemi che si trovano in una regione dello spazio (Π, U) che il pensiero fisico tradizionale non aveva concepito come accessibile: alta prestazione, bassa comprensione. Che questa regione sia epistemicamente coerente — che la prestazione senza comprensione sia davvero conoscenza nel senso fisico, o solo un surrogato di essa — è la domanda che il Blocco VI affronterà nella sua forma più articolata.

Blocco VI — Verso una teoria della lettura della natura

Sintesi epistemologica e connessione con le monografie precedenti

---

§ 6.1 — La lettura della natura: prima formulazione e giustificazione del termine

I cinque blocchi precedenti hanno costruito, attraverso registri disciplinari distinti, le componenti di un'unica argomentazione che può ora essere raccolta nella sua forma completa. Il Blocco I ha misurato con precisione formale la distanza tra formalismo e comprensione nella meccanica quantistica: dodici cifre decimali di accordo sperimentale, irresolvibilità interpretativa strutturale. Il Blocco II ha documentato empiricamente la struttura cognitiva della comprensione fisica: percettiva, analogica, tacitamente fondata, dominio-specifica, costruita nell'interazione con il dominio e distinta

sistematicamente dalla padronanza del formalismo. Il Blocco III ha mostrato storicamente come il rapporto tra intuizione fisica e formalismo si sia trasformato, culminando nella frattura deliberata della meccanica quantistica. Il Blocco IV ha analizzato questa frattura come paradosso della completezza: forma inversa della situazione gödeliana. Il Blocco V ha documentato come i sistemi artificiali applicati alla fisica raggiungano la precisione predittiva del formalismo senza acquisire le strutture cognitive che i fisici esperti costruiscono nel dominio.

Il Blocco VI raccoglie questi argomenti e li porta a convergenza verso una proposta epistemologica positiva. La proposta ha carattere costruttivo: non è solo la tesi negativa che la comprensione non si riduca alla prestazione predittiva, ma articola in modo preciso quali strutture cognitive costituiscono la comprensione fisica, come si organizzano, perché il formalismo completo non le cattura, e perché i sistemi artificiali — per quanto corretti nelle previsioni — ne rimangono privi nel senso strutturale.

La comprensione fisica è **lettura della natura**: un processo cognitivo attraverso cui un agente situato costruisce e abita un modello fisicamente orientato del mondo — un modello che ha carattere spaziale, dinamico, causale e analogico, che precede il formalismo e lo orienta, che permane come struttura di orientamento anche dopo che il formalismo è costruito, e che non si riduce alla capacità di manipolare il formalismo correttamente, nemmeno quando quella manipolazione produce previsioni di precisione arbitraria.

La scelta del termine *lettura* è deliberata e richiede una giustificazione che va al di là della metafora galileiana. Leggere, nel senso fenomenologico che la filosofia dell'interpretazione ha analizzato da Schleiermacher a Ricoeur, è un processo che non si riduce alla decodifica sintattica: è la costruzione attiva di un significato che eccede i segni sul foglio, attraverso l'attivazione di strutture cognitive preesistenti — schemi, aspettative, conoscenze pregresse, orizzonti culturali — che il lettore porta al testo. La stessa stringa di segni produce oggetti cognitivi radicalmente diversi in lettori diversi: un poema di Celan letto da un germanista e processato da un sistema di

analisi sintattica automatica non produce lo stesso oggetto cognitivo, anche se i simboli analizzati sono identici. La differenza non è nella velocità di processing né nella correttezza grammaticale: è nella relazione tra le rappresentazioni prodotte e il mondo di significati cui il testo appartiene.

Analogamente, la natura «letta» da un fisico esperto e gli stessi dati elaborati da un sistema di apprendimento automatico non producono lo stesso oggetto cognitivo, anche quando i dati numerici analizzati sono identici e le previsioni prodotte sono identicamente corrette. Il fisico porta alla natura una struttura cognitiva — percettiva, causale, analogica, ontologica — che i dati da soli non contengono e che nessun sistema di apprendimento automatico, per quanto potente, può estrarre dai soli dati senza una struttura teorica preesistente che li organizzi.

Il termine *lettura della natura* evoca la formula galileiana del libro della natura scritto in caratteri matematici (il *Saggiatore*, 1623): la proposta di questa monografia è che imparare la lingua matematica — possedere il formalismo — sia necessario ma non sufficiente per leggere il libro; occorre un lettore che *abiti* il libro mentre lo legge, che costruisca un'immagine fisica del mondo attraverso il formalismo e non si limiti a elaborare il formalismo come struttura sintattica. Questa abitazione non è decorativa: è la struttura cognitiva che rende il formalismo fisicamente orientato piuttosto che meramente matematicamente corretto.

---

§ 6.2 — Quattro componenti della lettura della natura

La lettura della natura si articola in quattro componenti distinte che i blocchi precedenti hanno preparato ciascuna in modo specifico. Le quattro componenti non sono indipendenti ma si supportano reciprocamente; la loro distinzione è tuttavia concettualmente necessaria per valutare cosa i sistemi artificiali acquisiscano e cosa non acquisiscano, e per confrontare il caso della fisica con i casi della matematica e dei giochi nelle monografie precedenti.

6.2.1 — La comprensione percettiva

La **comprensione percettiva** è la capacità del fisico esperto di *vedere* strutture fisiche dove il novizio — e il sistema artificiale — vede dati o descrizioni. Il Blocco II ha documentato questa capacità attraverso gli studi di Chi, Feltovich e Glaser (1981): i fisici esperti categorizzano i problemi in base alle strutture fisiche sottostanti («conservazione dell'energia», «forze centrali») mentre i novizi li categorizzano in base alla superficie sensoriale («piano inclinato», «molla»). La differenza non è di contenuto proposizionale ma di struttura percettiva: gli esperti hanno costruito, attraverso migliaia di ore di pratica, una modalità di *visione* del dominio fisico che rende certe strutture immediatamente salienti — nel modo in cui la struttura armonica è udibile per il musicista esperto come caratteristica percettiva diretta, non come risultato di inferenza.

Un'analisi formale chiarisce cosa significa costruire questa modalità di visione. Sia P l'insieme delle strutture percettive di un agente e D il dominio fisico. La comprensione percettiva è la costruzione di una mappa $\phi: D \to P$ che associa a ogni configurazione fisica del dominio la struttura percettiva sotto cui essa appare all'agente. Per il novizio, ϕ è una mappa sulle caratteristiche sensorialmente accessibili della descrizione; per l'esperto, ϕ è una mappa sulle strutture fisiche sottostanti — conservazione, simmetria, invarianza, causalità. La costruzione di $\phi_{esperto}$ avviene nell'interazione prolungata con il dominio e non è accessibile semplicemente attraverso l'apprendimento del formalismo.

La differenza tra $\phi_{novizio}$ e $\phi_{esperto}$ non è quantitativa: è strutturale. Il novizio non *vede meno chiaramente* le strutture fisiche; le *vede altre cose*. La pratica del dominio fisico non aggiunge semplicemente conoscenza proposizionale: trasforma la struttura percettiva dell'agente, nel senso preciso che certi oggetti cognitivi — la struttura hamiltoniana di un sistema, l'invarianza di gauge di una teoria dei campi, la struttura a multipoli di un campo — diventano percettivamente salienti, visibili prima di essere calcolati.

Per i sistemi artificiali, questa componente è assente in modo strutturale e non contingente. Un sistema che apprende la relazione statistica $P(forza|configurazione)$ dai dati non costruisce $\phi_{esperto}: D \to S$ nel senso fisicamente rilevante: al più apprende una proiezione della struttura fisica nelle correlazioni statistiche dei dati, che può essere funzionalmente equivalente alla $\phi_{esperto}$ per certi problemi ma non ha la stessa struttura cognitiva. La differenza si manifesta nei casi nuovi: il sistema artificiale interpola all'interno della distribuzione di addestramento; il fisico esperto naviga verso strutture fisiche che non ha mai incontrato utilizzando la mappa $\phi_{esperto}$ come strumento di orientamento.

6.2.2 — La comprensione causale

La **comprensione causale** è la capacità di rispondere alla domanda *perché* nel senso fisico rilevante: quale meccanismo fisico produce il fenomeno osservato, quale struttura teorica spiega la relazione quantitativa trovata, quale principio più fondamentale implica la legge derivata empiricamente.

Il Blocco V ha mostrato che questa componente è sistematicamente assente nei sistemi artificiali analizzati. AlphaFold2 non può spiegare perché una specifica proteina ha la struttura che ha in termini fisici; può calcolare, per ogni sequenza amminoacidica, la struttura tridimensionale probabile, ma la risposta al *perché* quella struttura — in termini di interazioni idrofobiche, di ponti idrogeno, di tensioni steriche — non è accessibile dal modello. Analogamente, il sistema AI Feynman di Udrescu e Tegmark riscopre la legge di gravitazione universale $F = Gm_1m_2/r^2$ a partire dai dati numerici, ma non sa che la dipendenza $1/r^2$ è la conseguenza necessaria della struttura tridimensionale dello spazio fisico e del teorema di Gauss applicato a una sorgente puntiforme.

La comprensione causale richiede, nel senso tecnico di Pearl (2000), non solo le correlazioni statistiche $P(y|x)$ tra grandezze fisiche ma le relazioni interventistiche $P(y|do(x))$ che descrivono cosa accadrebbe se si modificasse attivamente il valore di x mantenendo tutte le altre

variabili fisse. Un sistema che ha appreso la correlazione statistica tra sequenza amminoacidica e struttura proteica non conosce la relazione causale: non sa automaticamente cosa accadrebbe alla struttura se si sostituisse il residuo in posizione k con uno di carica opposta, a meno che quella perturbazione specifica sia rappresentata nell'insieme di addestramento.

Il fisico che comprende la teoria del funnel energetico del ripiegamento proteico, invece, ha accesso alla struttura causale: sa che la forza dominante è la minimizzazione dell'energia libera del sistema proteina-solvente, che le interazioni idrofobiche tendono a sequestrare residui apolari all'interno della struttura, che il costo entropico di questa compattazione è bilanciato dal guadagno entalpico delle interazioni stabili. Queste relazioni causali sono *derivabili* dalla struttura teorica della biofisica, non solo *presenti* nelle correlazioni statistiche dei dati — e permettono al fisico di fare previsioni su configurazioni non presenti nel training set.

La comprensione causale ha una proprietà importante per il confronto con i sistemi artificiali: è **generalizzativa in modo strutturalmente controllato**. Il fisico che comprende causalmente un fenomeno può generalizzare le sue previsioni verso configurazioni non osservate in modo giustificato dalla struttura teorica — non solo per interpolazione statistica ma per inferenza causale dalla teoria. Il sistema artificiale senza comprensione causale può generalizzare solo per interpolazione, e la sua affidabilità fuori dalla distribuzione di addestramento è strutturalmente non garantita.

6.2.3 — La comprensione strutturale

La **comprensione strutturale** è la capacità di vedere i legami tra teorie diverse, riconoscere quando una legge fisica è un caso particolare di un principio più generale, identificare le simmetrie che una teoria deve rispettare prima di conoscerne i dettagli — ciò che il Blocco III ha mostrato storicamente nella struttura hamiltoniana che prefigurava la meccanica quantistica, e nella covarianza delle equazioni di Maxwell come anticipazione della struttura relativistica.

La comprensione strutturale può essere formalizzata attraverso il concetto di **rete di teorie** $N = (T, \leq, \phi)$, dove T è un insieme di teorie fisiche, $\leq$ è una relazione di riduzione-derivazione ($T_1 \leq T_2$ significa che T_1 è riducibile a T_2 come caso limite o approssimazione) e $\phi: T \times T \to R^+$ è una misura di distanza strutturale. Un fisico con alta comprensione strutturale possiede una rappresentazione ricca di N: sa che la meccanica newtoniana è il limite $c \to \infty$ della relatività speciale, che la meccanica classica è il limite $\hbar \to 0$ della meccanica quantistica, che la termodinamica è una teoria efficace della meccanica statistica nel limite termodinamico $N \to \infty$.

Questa rete di relazioni permette al fisico di navigare il dominio in modo che il sistema artificiale non può. Se si incontra un fenomeno nuovo in un regime dove nessuna teoria è stata sviluppata esplicitamente, il fisico può stimare quale teoria sia applicabile identificando quale limite o approssimazione si trova nella rete N. Il sistema artificiale che ha appreso le correlazioni statistiche su dati fisici non possiede questa rete: può interpolate all'interno della distribuzione di addestramento, ma non può navigare lo spazio delle teorie attraverso relazioni strutturali quando si trova fuori distribuzione.

Un esempio concreto: quando nel 2015 si rilevò per la prima volta un segnale di onde gravitazionali compatibile con la fusione di due buchi neri (GW150914, Abbott et al., 2016), i fisici del LIGO poterono identificarlo come tale perché sapevano — attraverso la rete di teorie N — che la relatività generale predice un segnale con quella precisa struttura di chirp (frequenza crescente con l'ampiezza crescente, poi caduta rapida), che questa struttura è invariante al cambio di coordinate, e che i disturbi di origine terrestre hanno strutture di correlazione temporale diverse. Questa navigazione strutturale — dal segnale grezzo alla teoria e viceversa — richiede la comprensione strutturale nel senso pieno. Un sistema artificiale addestrato a riconoscere pattern in segnali già etichettati non l'avrebbe potuta fare per un tipo di evento mai osservato prima.

La comprensione strutturale ha un ruolo epistemologicamente fondamentale nella scoperta scientifica. Il Blocco VII tornerà su questo punto in modo più dettagliato attraverso il criterio di Feynman — la molteplicità delle vie d'accesso come misura della comprensione. Anticipando: la comprensione strutturale è precisamente ciò che permette al fisico di avere $n(L, A) > 1$ vie d'accesso a una legge — di derivarla da teorie diverse — e il nucleo comprensivo che l'intersezione di queste derivazioni rivela è la struttura più profonda della legge stessa.

6.2.4 — La comprensione ontologica

La **comprensione ontologica** — la quarta componente e la più profonda — è la capacità di costruire un modello del mondo fisico che sia *abitabile* cognitivamente: un'immagine coerente di cosa esiste, come è strutturato, come si comporta; un'immagine che il fisico possa abitare nel senso dell'*Einfühlung* einsteiniana, che guidi la ricerca e orienti l'intuizione anche prima che il formalismo sia completamente sviluppato.

Nella meccanica newtoniana, la comprensione ontologica è pienamente accessibile: il fisico abita un mondo di corpi materiali con posizioni, velocità e momenti definiti in ogni istante, soggetti a forze causalmente intelligibili. Nella relatività generale, richiede uno sforzo cognitivo notevole — l'intuizione della curvatura dello spaziotempo non è immediata — ma ha una lettura geometrica coerente e universalmente accettata: la massa curva lo spazio-tempo, e le geodetiche dello spazio-tempo curvo sono le traiettorie dei corpi liberi.

Nella meccanica quantistica, questa componente è parzialmente inaccessibile — non per limiti della mente umana ma per proprietà strutturali del dominio. Le cinque interpretazioni del Blocco IV — Copenaghen, molti mondi, Bohm, GRW, relazionale — sono cinque risposte incompatibili alla domanda ontologica su cosa descriva il formalismo. Nessuna di esse è cognitivamente inabitabile in senso assoluto, ma nessuna è cognitivamente abitabile nel senso pieno in cui la meccanica newtoniana è abitabile:

- **Copenaghen** richiede di sospendere la domanda ontologica, di trattare la funzione d'onda come strumento di calcolo delle probabilità e non come descrizione della realtà: cognitivamente, è un'economia di domande, non un'immagine del mondo.
- **Molti mondi** richiede di abitare un'ontologia con un numero non numerabile di copie di ogni osservatore, in universi paralleli che non interagiscono: formalmente coerente, cognitivamente inabitabile nel senso dell'*Einfühlung*.
- **Bohm** richiede di abitare un mondo con una forza di guida non-locale che si propaga istantaneamente attraverso lo spazio, invisibile perché non influenza direttamente le statistiche di misura: più vicina all'ontologia classica, ma con una non-località strutturale difficile da abitare in modo fisicamente intuitivo.
- **GRW** richiede di abitare un mondo con collassi spontanei della funzione d'onda che non hanno causa fisica identificabile: una discontinuità ontologica che il formalismo non motiva.

Il punto cruciale è che nessun fisico ha costruito, a partire da queste interpretazioni, una comprensione ontologica della meccanica quantistica che sia condivisa dalla comunità scientifica — il che significa non solo che il problema è difficile, ma che la struttura del dominio resiste all'abitazione cognitiva nel senso che la lettura della natura richiede.

---

§ 6.3 — Il fisico e la macchina: comparazione strutturale

Le quattro componenti della lettura della natura permettono una comparazione strutturale precisa tra il fisico esperto e i sistemi artificiali analizzati nel Blocco V — una comparazione che evita sia la sottovalutazione di ciò che i sistemi artificiali fanno sia la sopravvalutazione di ciò che la comprensione fisica richiede.

Introduciamo una **matrice di comprensione** C in cui la riga indica l'agente e la colonna indica la componente (U_{perc}: percettiva; U_{caus}: causale; U_{struct}: strutturale; U_{ontic}: ontologica):

Agente				
Fisico esperto				
Fisico novizio				
AlphaFold2				
AI Feynman				
FermiNet				

Le note agli asterischi meritano sviluppo preciso.

Nota (*): La comprensione ontologica del fisico esperto nella meccanica quantistica è parzialmente inaccessibile per le ragioni del Blocco IV — non come fallimento del fisico ma come proprietà strutturale del dominio. In altri domini della fisica classica, U_{ontic} sarebbe $\gg 0$.

Nota (**): AlphaFold2 ha comprensione strutturale *parziale* per via dell'architettura del modulo *Invariant Point Attention* (IPA), che è progettato per rispettare l'invarianza di rototraslazione nello spazio tridimensionale — una simmetria fisica reale della struttura proteica. Tuttavia, questa comprensione strutturale è incorporata dal fisico progettista nell'architettura, non acquisita autonomamente dal sistema dai dati. AlphaFold2 non «sa» di avere invarianza di rototraslazione; rispetta quella invarianza perché la struttura matematica che la implementa è stata scelta da un essere umano che capiva perché fosse necessaria.

Nota (***): FermiNet ha comprensione strutturale significativa per via dell'antisimmetria fermionistica e delle simmetrie $SO(3)$ incorporate nell'architettura. Il principio di Pauli — la funzione d'onda elettronica deve essere antisimmetrica rispetto allo scambio di due qualsiasi elettroni — è implementato attraverso la struttura del

determinante di Slater nella base della rete. La rete apprende le correlazioni residue (l'energia di correlazione che va oltre il campo medio di Hartree-Fock), ma il vincolo strutturale dell'antisimmetria è imposto a priori dalla fisica, non appreso dai dati. La comprensione strutturale di FermiNet è, in senso preciso, la comprensione strutturale del fisico che l'ha progettata, codificata nell'architettura.

Questa nota ha un'implicazione epistemologica generale: i contributi dei sistemi artificiali alla fisica spesso incorporano la comprensione fisica dei loro progettisti sotto forma di vincoli architetturali, simmetrie imposte, prior fisici nella funzione di perdita. La prestazione del sistema dipende dalla comprensione fisica del suo progettista in modo non sempre visibile nella valutazione dei risultati. Valutare i sistemi artificiali in fisica richiederebbe quindi anche un'analisi delle strutture fisiche incorporate nell'architettura — un audit epistemico che le valutazioni standard di benchmark non effettuano.

La riga del **fisico novizio** è illuminante: non ha sviluppato nessuna delle quattro componenti, ma padroneggia il formalismo (sa risolvere le equazioni, applicare le regole di Feynman, eseguire i calcoli corretti). Questo mostra che la padronanza del formalismo è una quinta componente — chiamiamola U_{form} — che è distinta da tutte e quattro le altre e può essere presente senza di esse. Il fisico novizio ha $U_{form} \gg 0$ e $U_{perc} \approx U_{caus} \approx U_{struct} \approx U_{ontic} \approx 0$. Il sistema artificiale addestrato sul formalismo fisico ha anche $U_{form} > 0$ (può manipolare le equazioni, calcolare integrali, applicare regole di trasformazione), ma non le altre.

La tesi della monografia può essere ora formulata con precisione: la comprensione fisica è $U = \left(U_{perc}, U_{caus}, U_{struct}, U_{ontic}, U_{form}\right)$, e la lettura della natura corrisponde a un vettore con tutte le prime quattro componenti significativamente positive — non solo U_{form}. L'intelligenza artificiale applicata alla fisica produce sistemi con $U_{form} > 0$ e spesso $U_{struct} > 0$ (incorporata dall'architettura), ma con

le componenti percettiva, causale e ontologica sostanzialmente assenti.

---

§ 6.4 — Implicazioni per la filosofia della fisica

Le quattro componenti della lettura della natura e la comparazione strutturale hanno implicazioni per tre problemi distinti della filosofia della fisica contemporanea.

6.4.1 — Il realismo scientifico riformulato

Il **realismo scientifico** nella sua versione standard (Psillos, 1999) afferma che le teorie fisiche mature descrivono approssimativamente la struttura causale della realtà, e che il loro successo predittivo è la miglior evidenza di questa descrizione. L'argomento dell'assenza di miracoli di Putnam: se le teorie non descrivono la realtà, il loro successo è miracoloso — e i miracoli non si spiegano.

Il paradosso della completezza costituisce una sfida specifica all'argomento dell'assenza di miracoli. La meccanica quantistica ha un successo predittivo ineguagliato nella storia della scienza, e le sue interpretazioni ontologiche sono radicalmente incompatibili. Se il realismo scientifico ha ragione, dovrebbe poter rispondere: quale interpretazione descrive la realtà? Il successo predittivo non risponde a questa domanda, perché tutte le interpretazioni producono le stesse previsioni.

La risposta che la teoria della lettura della natura suggerisce è una forma di **realismo strutturale epistemico** (Worrall, 1989): ciò che le teorie fisiche mature colgono con approssimazione crescente è la struttura matematica delle relazioni fisiche — le simmetrie, le leggi di conservazione, le relazioni funzionali tra grandezze — non necessariamente il substrato ontologico che produce quelle strutture.

Il successo predittivo della meccanica quantistica evidenzia che la struttura matematica del formalismo — lo spazio di Hilbert, gli operatori hermitiani, la regola di Born — cattura strutture reali del mondo fisico. Queste strutture sono reali nel senso che sono **necessarie**: qualsiasi teoria che produca le previsioni corrette deve

avere questa struttura. Ma la struttura non implica un'ontologia unica — e il paradosso della completezza è la misura precisa di questa non-unicità.

La comprensione strutturale del fisico esperto è proprio la comprensione di queste strutture reali: simmetrie di gauge, gruppi di Lie, invarianza di Lorentz, algebra degli operatori. Il fatto che questa comprensione sia presente nel fisico ma non nei sistemi artificiali non significa che sia irrilevante per la fisica: significa che è il tipo di comprensione che permette di fare fisica, non solo di applicare formalismo già sviluppato.

6.4.2 — Fisica e matematica: il problema dell'efficacia irragionevole

Wigner (1960) ha osservato che la matematica sviluppata autonomamente — senza motivazione fisica diretta — risulta irragionevolmente efficace per descrivere il mondo fisico. I gruppi di Lie sviluppati da Sophus Lie nel XIX secolo descrivono le simmetrie della meccanica quantistica; la geometria riemanniana è il linguaggio della relatività generale; l'algebra degli operatori di von Neumann è il formalismo naturale della meccanica quantistica.

La teoria della lettura della natura suggerisce una prospettiva su questo problema. Se la comprensione strutturale del fisico consiste nel navigare la rete di teorie N attraverso relazioni di riduzione, analogia e simmetria, e se la matematica fornisce le strutture in cui queste relazioni possono essere codificate con precisione, allora l'efficacia della matematica non è irragionevole: è la conseguenza del fatto che il mondo fisico ha struttura — e la matematica è lo studio della struttura in senso lato.

La posizione speculare alla situazione gödeliana è qui rilevante. Nella matematica c'è un eccesso dell'intuizione sul formalismo: il matematico vede strutture prima di dimostrarle (§ 6.5.2). Nella fisica, nel dominio quantistico, c'è un eccesso complementare: il formalismo ha raggiunto una completezza predittiva che l'intuizione non ha ancora raggiungo nel senso ontologico. La lettura della natura è la pratica cognitiva che cerca di colmare — senza mai eliminare completamente — questa distanza tra formalismo e intuizione,

abitando il formalismo con strutture cognitive che lo rendono fisicamente orientato. Nella meccanica classica, il colmamento è pienamente possibile. Nella meccanica quantistica, è parziale, e il paradosso della completezza è la misura di questa parzialità.

Il problema dell'efficacia irragionevole si dissolve parzialmente quando si riconosce che la matematica sviluppata dai matematici non è sviluppata in isolamento cognitivo dalla fisica: i matematici del XIX e XX secolo lavoravano in un contesto intellettuale permeato dalla fisica, e molte delle strutture matematiche che risultano poi efficaci in fisica erano motivate da problemi fisici — anche quando i matematici le sviluppavano in modo apparentemente autonomo. La geometria riemanniana era motivata dalla domanda sulla curvatura dello spazio fisico; l'algebra degli operatori di Hilbert e von Neumann era motivata dalla meccanica quantistica emergente. La distinzione tra matematica pura e matematica applicata è meno netta di quanto l'*unreasonable effectiveness* di Wigner suggerisca.

6.4.3 — Comprensione artificiale in fisica: un criterio più preciso

Il dibattito contemporaneo sull'intelligenza artificiale in fisica rischia di restare intrappolato in un criterio behaviorista della comprensione: comprende chi produce le previsioni corrette. Questo criterio ha la stessa struttura dell'operazionismo nel test di Turing, e incontra le stesse obiezioni classiche: la corretta esecuzione di operazioni simboliche non implica comprensione semantica. L'argomento della stanza cinese di Searle — un sistema che manipola simboli secondo regole sintattiche può produrre output correttamente senza avere accesso al significato dei simboli — si applica direttamente ai sistemi artificiali che manipolano equazioni fisiche.

La teoria della lettura della natura propone un criterio diverso e più preciso. La comprensione fisica di un agente può essere valutata attraverso cinque componenti: U_{perc}, U_{caus}, U_{struct}, U_{ontic}, U_{form}. Il criterio behaviorista misura solo U_{form} (e parzialmente U_{struct} quando il sistema rispetta simmetrie fisiche). La lettura della natura richiede le prime quattro.

La distinzione operativa che questo criterio produce è la seguente: **usare un sistema artificiale come acceleratore di raccolta dati** è epistemicamente diverso da **usare un sistema artificiale come sostituto della comprensione fisica**. Nel primo caso, il sistema produce dati o calcoli che il fisico umano interpreta, struttura e comprende causalmente e strutturalmente. Nel secondo caso, il sistema viene trattato come un oracolo — la cui risposta corretta equivale a comprensione. La differenza non è tecnica: è epistemica, e ha conseguenze pratiche per il modo in cui la fisica viene fatta e valutata.

Un esempio concreto: usare AlphaFold2 per ottenere la struttura di una proteina e poi studiare quella struttura per capire il meccanismo di ripiegamento — quali interazioni la stabilizzano, quale pathway evolutivo l'ha prodotta — è epistemicamente diverso dall'usare AlphaFold2 come risposta definitiva alla domanda sul ripiegamento. Nel primo caso, la comprensione fisica è costruita dall'agente umano attraverso le strutture predette dal sistema. Nel secondo caso, si confonde la previsione corretta con la comprensione fisica che la previsione non contiene. Rendere esplicita questa distinzione — attraverso una teoria della comprensione fisica abbastanza articolata da distinguere i due casi — è uno dei contributi che questa monografia offre al dibattito.

---

§ 6.5 — Le tre monografie: navigazione, visione, lettura

Il Blocco VI si chiude con il complemento esplicito alle due monografie precedenti di questa serie, che l'intera struttura dell'opera ha preparato e che può ora essere formulato con la precisione costruita nei sei blocchi.

6.5.1 — La prima monografia: navigazione di significato

La prima monografia — *Il Go come laboratorio della mente* — ha analizzato l'expertise nei giochi astratti come caso in cui la crisi dell'intelligenza artificiale illumina strutture cognitive che senza quella crisi sarebbero rimaste implicite.

AlphaZero calcola valutazioni di posizione $V: P \to [-1, 1]$ sullo spazio delle posizioni del go, ottimizzate per massimizzare la probabilità di vittoria attraverso *self-play* e monte carlo tree search. Queste valutazioni funzionano — AlphaZero vince sistematicamente contro i migliori giocatori umani — ma non hanno struttura di significato nel senso rilevante. Cosa significa questo concretamente?

Un maestro di go che guarda la posizione di apertura *sanrensei* — tre pietre nere disposte a distanza simmetrica sui punti star del bordo — riconosce non solo il valore strategico della configurazione (controllo dei bordi, influenza sul centro), ma la sua appartenenza a una tradizione di studio millenaria, le sue connessioni con i principi di Takemiya Masaki sulla fisica del go come costruzione di *moyo* (spazio di influenza), le partite celebri in cui quella struttura è stata usata o confutata. La posizione non è solo un valore numerico: è un nodo in una rete di significati condivisi dalla comunità dei giocatori, che orientano la lettura della partita molto prima che il calcolo arrivi. Quando un maestro umano dice «questa forma è *aji keshi*» — essa distrugge il potenziale strategico futuro — sta descrivendo una struttura tattica con un nome che porta con sé secoli di analisi collettiva. AlphaZero assegna un valore alla mossa, ma non vede l'*aji keshi* come categoria: vede un numero.

La tesi della prima monografia è che l'expertise umana nei giochi è **navigazione di significato**: orientarsi in uno spazio di posizioni attraverso un sistema di valori, preferenze estetiche e orientamenti cognitivi che costituisce il go come pratica culturale, non riducibile alla funzione di valore di AlphaZero anche quando quest'ultima produce risultati operativi superiori. La crisi prestazionale — la macchina vince — non dissolve la distinzione cognitiva ma la rende più acuta: la macchina ottiene il risultato senza la struttura cognitiva attraverso cui il risultato ha significato per un agente situato.

Un secondo punto di differenza, direttamente rilevante per il confronto con la monografia presente, riguarda il *trasferimento*. La navigazione di significato del maestro di go si trasferisce — parzialmente, con resistenza — a domini differenti: alla strategia, all'architettura, alla pedagogia della concentrazione. Questa

trasferibilità non è accidentale: emerge dalla struttura della comprensione come rete di analogie e principi che eccede il dominio specifico. La funzione di valore di AlphaZero non si trasferisce: addestrata sul go, non ha nulla da dire sugli scacchi. La comprensione è trasferibile perché è strutturalmente ricca; la prestazione ottimizzata è dominio-specifica perché è strutturalmente vuota.

Formalmente: sia M_G lo spazio di significato del gioco G (le narrazioni, le valutazioni estetiche, le categorie tattiche e strategiche condivise dalla comunità di giocatori), e sia $V_{AI}: P \to R$ la funzione di valutazione del sistema artificiale. La navigazione di significato del giocatore esperto è una mappa $\mu: P \to M_G$ che associa a ogni posizione la sua collocazione nello spazio di significato del gioco. Il sistema artificiale ha V_{AI} ma non μ: valuta le posizioni senza abitare il gioco nel senso culturale e cognitivo.

6.5.2 — La seconda monografia: visione di struttura

La seconda monografia — *La visione e la dimostrazione* — ha analizzato la comprensione matematica come caso in cui la crisi della formalizzazione — i teoremi di incompletezza di Gödel — illumina la struttura della mente matematica che il programma logicista aveva oscurato.

Il teorema di incompletezza di Gödel afferma che per ogni sistema formale T consistente e sufficientemente ricco, esiste un enunciato GT_T tale che $T \nvdash GT_T$ e $T \nvdash \neg GT_T$, mentre GT_T è vero nell'interpretazione standard. Il matematico vede la verità di GT_T attraverso il ragionamento meta-formale che Gödel ha costruito — la numerazione gödeliana, il lemma di diagonale, la struttura del paradosso del mentitore formalizzato — senza poterla dimostrare all'interno di T. Questa visione eccede la dimostrazione formale.

La tesi della seconda monografia è che questa eccedenza è strutturale e non contingente. La **visione di struttura** — il processo cognitivo attraverso cui il matematico costruisce e abita un sistema di

orientamenti che precede e orienta la dimostrazione formale — è esattamente la struttura cognitiva che permette di vedere verità che il sistema formale non dimostra. La storia della matematica del XX secolo offre casi paradigmatici che la monografia analizza in dettaglio.

Srinivasa Ramanujan formulò centinaia di identità sui numeri interi — sulle somme di serie, sulle partizioni, sulle funzioni modulari — con una sicurezza che gli ispirava la formulazione prima della dimostrazione. La corrispondenza con G. H. Hardy documenta che Ramanujan «vedeva» le identità prima di poterle giustificare formalmente, e che la visione precedeva sistematicamente la giustificazione. Non si trattava di intuizione vaga: Ramanujan aveva ragione in quasi tutti i casi. La struttura cognitiva che produceva quella sicurezza non era la manipolazione formale dei simboli — Ramanujan conosceva le tecniche standard ma non le usava come fonte primaria di orientamento — ma qualcosa di più diretto: un'abitudine alla struttura dei numeri che rendeva visibile la forma delle identità prima della loro verifica. Questa struttura cognitiva è la visione di struttura nel senso preciso della monografia.

Il confronto con i proof assistant — Lean, Coq, Isabelle — formalizza la distinzione. I proof assistant verificano dimostrazioni con velocità e affidabilità incommensurabili con quelle umane: dato un enunciato e una struttura di dimostrazione, verificano formalmente ogni passo con garanzia assoluta. Ma non congetturano. Non hanno la capacità di formulare enunciati nuovi e profondi che valgono la pena di essere dimostrati. La congettura di Fermat, la congettura di Poincaré, la congettura ABC: nessuna di queste è stata formulata da un algoritmo di ricerca sistematica. Sono state formulate da menti matematiche che abitavano il dominio in modo da vedere strutture che attendevano di essere dimostrate. Il proof assistant amplifica la capacità di verifica; non sostituisce la visione di struttura che determina cosa è degno di essere verificato.

Formalmente: sia V lo spazio delle visioni matematiche (congetture, intuizioni strutturali, analogie profonde tra domini) e sia D lo spazio delle dimostrazioni formali. La visione di struttura del matematico

esperto è una mappa $\nu: T \to V$ che associa a ogni teoria matematica T un insieme di visioni strutturali non derivabili formalmente da T. Il proof assistant ha accesso a D — può verificare $T \vdash \phi$ per ogni ϕ e T — ma non a $\nu(T)$.

6.5.3 — La struttura tridimensionale: una formalizzazione compatta

Le tre tesi — navigazione di significato, visione di struttura, lettura della natura — non sono indipendenti: sono tre articolazioni di un'unica struttura cognitiva che la formalizzazione completa non cattura. Si può rendere questa struttura formale in modo compatto.

Sia D un dominio cognitivo complesso, $F(D)$ il suo formalismo completo (le regole del gioco, il sistema formale della teoria, il formalismo fisico), e $C_H(D)$ la comprensione che un agente umano esperto possiede di D. La tesi centrale delle tre monografie è:

$C_H(D) \not\subseteq F(D)$,

ovvero la comprensione umana eccede il formalismo in modo strutturale e irriducibile in ogni dominio cognitivo complesso. La forma specifica di questa eccedenza $C_H \backslash F$ varia con il dominio:

- **Giochi**: $C_H \backslash F$ è la navigazione di significato — l'orientamento attraverso valori estetici e culturali che le regole non contengono.
- **Matematica**: $C_H \backslash F$ è la visione di struttura — la capacità di vedere verità che il sistema formale non dimostra, nel senso preciso di Gödel.
- **Fisica**: $C_H \backslash F$ è la lettura della natura — la costruzione di un modello fisicamente abitato del mondo che il formalismo predittivo non determina.

Le tre forme di eccedenza si specificano nello stesso tipo di struttura cognitiva: la capacità di un agente situato di orientarsi in un dominio complesso attraverso modelli che eccedono le regole esplicite, costruiti attraverso l'esperienza nel dominio e non derivabili dal formalismo anche quando il formalismo è completo o corretto.

Questa struttura è ciò che manca nei sistemi artificiali — nel go, nella matematica, nella fisica — non come difetto tecnico contingente ma come differenza strutturale tra il tipo di agente che comprende e il tipo di sistema che elabora.

Infine, si può notare una progressione di complessità tra le tre monografie che non è accidentale. Nei giochi, il formalismo è *completo* nel senso banale: le regole specificano tutto ciò che è rilevante per la vittoria, e la struttura di significato che eccede le regole è culturale e non vincolante per la performance. Nella matematica, il formalismo è *incompleto* nel senso gödeliano: la verità eccede la dimostrabilità, e l'eccedenza è strutturale e dimostrabile. Nella fisica quantistica, il formalismo è *predittivamente completo* ma *ontologicamente aperto*: la forma più sottile e più radicale di eccedenza della comprensione sul formalismo, perché qui l'eccedenza non è colmabile dall'intelligenza umana — nemmeno dalla più acuta — senza una rivoluzione concettuale del tipo di quelle che la storia della fisica ha già prodotto due volte (relatività speciale, meccanica quantistica), e che qui apparirebbe non come scoperta di una nuova teoria ma come risoluzione del problema interpretativo che la teoria già completa pone a se stessa.

---

§ 6.6 — Il limite come punto di partenza

C'è un'asimmetria tra la conclusione di questa monografia e quella delle due precedenti che merita di essere resa esplicita, perché è costitutiva della posizione difesa e illumina qualcosa di importante sulla natura della fisica come impresa conoscitiva.

Le prime due monografie si chiudono su un risultato di incompletezza *relativa*: i sistemi artificiali nei giochi non navigano il significato; i proof assistant non vedono la struttura matematica. In entrambi i casi, la capacità umana che eccede la prestazione artificiale è accessibile — si manifesta nei giocatori esperti, nei matematici creativi — e il confronto con la macchina la illumina per contrasto.

Questa monografia si chiude su una posizione più complessa. La comprensione ontologica della meccanica quantistica non è pienamente accessibile nemmeno al fisico umano, per ragioni che non dipendono dalla limitazione umana ma dalla struttura del dominio. Le cinque interpretazioni del Blocco IV non sono cinque soluzioni parziali in attesa di una soluzione unica: potrebbero essere cinque modi ugualmente legittimi di abitare un formalismo che è ontologicamente sottoindeterminato per ragioni di principio. Heisenberg aveva ragione quando abbandonò il requisito di *Anschaulichkeit*; Feynman aveva ragione quando disse che nessuno capisce la meccanica quantistica nel senso in cui si capisce la meccanica newtoniana.

Ma questo non è un esito scettico nel senso deteriore. La comprensione fisica è stratificata: le componenti percettiva, causale e strutturale sono pienamente accessibili al fisico esperto nella meccanica quantistica (anche se difficili da costruire); la componente ontologica è parzialmente inaccessibile a tutti. Questa stratificazione non è un fallimento: è la misura della profondità del problema fisico.

Si può formalizzare questa struttura attraverso il concetto di **completezza comprensiva** di un dominio fisico D:

$$CC(D) = \frac{\sum_i w_i U_i^*(D)}{\sum_i w_i U_i^{max}},$$

dove $U_i \in \{U_{perc}, U_{caus}, U_{struct}, U_{ontic}\}$ sono le componenti della comprensione, U_i^* è il livello raggiunto dal fisico esperto, U_i^{max} è il livello teoricamente possibile, e w_i sono pesi epistemici. Per la meccanica newtoniana, $CC \approx 1$; per la meccanica quantistica, $CC < 1$ perché $U_{ontic}^* < U_{ontic}^{max}$. Questo non è un giudizio sulla fisica quantistica come teoria: è una misura della distanza tra la completezza predittiva del formalismo e la completezza comprensiva del dominio.

La lezione conclusiva non è pessimistica: una natura che si lasciasse leggere interamente sarebbe meno interessante di una natura che

opponga resistenza. La meccanica quantistica ha rivelato che questa resistenza non è contingente: è strutturale, è la misura della profondità di ciò che la fisica cerca di leggere. E il limite della comprensione — il punto in cui il formalismo è completo e la comprensione rimane aperta — è non il fallimento della lettura, ma il suo punto di partenza permanente: la struttura cognitiva che mantiene il fisico orientato verso ciò che non capisce ancora, e che i sistemi artificiali — che ottimizzano funzioni di perdita su domini specificati — non posseggono nel senso in cui la possiede il lettore.

Riferimenti principali: Chi, Feltovich, Glaser (1981), «Categorization and representation of physics problems by experts and novices», *Cognitive Science* 5, 121; Pearl (2000), *Causality*, Cambridge; Worrall (1989), «Structural Realism: The Best of Both Worlds?», *Dialectica* 43, 99; Psillos (1999), *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*, Routledge; Wigner (1960), «The Unreasonable Effectiveness of Mathematics», *Communications on Pure and Applied Mathematics* 13, 1; Everett (1957), «Relative State Formulation of Quantum Mechanics», *Reviews of Modern Physics* 29, 454; Searle (1980), «Minds, Brains, and Programs», *Behavioral and Brain Sciences* 3, 417; Wallace (2012), *The Emergent Multiverse*, Oxford; Deutsch (1999), «Quantum theory of probability and decisions», *Proceedings of the Royal Society A* 455, 3129.

§ 6.7 — Il problema dell'esperienza: perché l'incorporazione non è un'aggiunta

L'argomento sviluppato nei sei blocchi precedenti può essere mal interpretato in un senso che vale la pena escludere esplicitamente. Si potrebbe pensare che la differenza tra la comprensione fisica del fisico esperto e il processing del sistema artificiale sia riducibile a una questione di *incorporazione* — che un sistema artificiale dotato di un corpo, capace di interagire fisicamente con il mondo, acquisisse automaticamente le componenti della lettura della natura che attualmente mancano. Questa lettura è sbagliata, e correggere l'errore chiarisce qualcosa di importante sulla struttura della comprensione fisica.

6.7.1 — Il problema dell'embodiment non è di architettura

Il fatto che la comprensione fisica sia incorporata nel senso delle neuroscienze cognitive — che il ragionamento fisico attivi sistemi motori e percettivi (§ 2.4) — non implica che aggiungere un corpo a un sistema artificiale sia condizione sufficiente per produrre comprensione fisica. L'incorporazione non è un'architettura: è una storia.

Il corpo del fisico esperto non è semplicemente un contenitore che ospita la sua mente: è la storia della sua interazione con il mondo fisico accumulata in decenni. L'attivazione dei sistemi motori nel ragionamento fisico non emerge dal fatto di avere muscoli, ma dal fatto di aver lanciato oggetti, sentito la resistenza dell'aria, calibrato la forza necessaria per alzare pesi di massa diversa, imparato a camminare su superfici di diversa attrito. Questa storia fisica incarnata è la base su cui si costruiscono le simulazioni motorie del ragionamento fisico documentate da Zago et al. (2008) — e non può essere compressa, trasferita o costruita senza attraversarla.

Chomsky ha distinto tra la *competenza* linguistica — la struttura cognitiva astratta che permette di generare e comprendere frasi — e la *performance* — la produzione linguistica concreta in condizioni reali. Una distinzione analoga è necessaria per la comprensione fisica: la *competenza* fisica (la struttura cognitiva della lettura della natura) e la *performance* fisica (la produzione di previsioni corrette in contesti specifici) sono distinte, e la seconda non implica la prima. Un sistema robotico capace di interagire fisicamente con oggetti e raccogliere dati su quella interazione non costruisce automaticamente la struttura cognitiva che la lettura della natura richiede: costruisce una banca dati di pattern sensori-motori, che è cognitivamente diversa.

6.7.2 — La dimensione temporale della comprensione

C'è un aspetto della costruzione dell'expertise fisica che l'analisi sincronica — la descrizione della struttura cognitiva del fisico esperto in un dato momento — non cattura: la sua dimensione **diacronica**, il fatto che la struttura cognitiva è il prodotto di un processo che si

svolge nel tempo e che include momenti di ristrutturazione che non possono essere compressi.

Vygotsky (1978) aveva già articolato il principio che ogni funzione cognitiva superiore appare due volte: prima come processo interpersonale — nello spazio sociale dell'interazione con mentori, colleghi, testi — e poi come processo intrapersonale, interiorizzato nella struttura cognitiva individuale. La comprensione fisica segue questa struttura diacronica in modo particolarmente visibile: il fisico attraversa anni di interazione con la comunità fisica — seminari, conferenze, correzioni di calcoli, discussioni alla lavagna — prima che le strutture cognitive sviluppate nella dimensione sociale si interiorizzino come comprensione individuale.

Questo processo non è accelerabile in modo arbitrario. La ricerca su cui si basa §2.9.1 — le diecimila ore di pratica deliberata — non è un'affermazione sulla quantità di tempo speso: è un'affermazione sul fatto che la trasformazione cognitiva che costituisce l'expertise richiede un certo tipo di interazione con il dominio, ripetuta nel tempo, con la frequenza giusta di conflitti cognitivi e ristrutturazioni. Un sistema che elabora 10^{12} esempi fisici in parallelo in pochi giorni di training non ha attraversato questo processo: ha compresso temporalmente un elaborazione statistica che non è la stessa cosa del processo diacronico di costruzione dell'expertise.

La compressione temporale non è un vantaggio epistemico illimitato: ha un limite strutturale. Alcuni processi cognitivi richiedono il tempo non perché siano lenti in modo contingente, ma perché sono strutturalmente dipendenti dalla sequenza — dalla modalità con cui la struttura cognitiva si costruisce progressivamente a partire da una base e attraverso specifiche crisi e ristrutturazioni. Un sistema che salta questa costruzione progressiva non ha un vantaggio: ha un tipo diverso di struttura cognitiva, con proprietà diverse.

6.7.3 — La comprensione come postura verso l'ignoto

C'è una componente della lettura della natura che nessuna delle analisi precedenti ha catturato esplicitamente, ma che è forse la più

importante per l'argomento della monografia: il modo in cui il fisico esperto si rapporta a ciò che *non capisce ancora*.

Einstein, descrivendo il suo processo creativo in una lettera a Hadamard (1945), scrive che la fase più importante della ricerca non è quella del calcolo ma quella dell'«orientamento verso il problema»: la costruzione di una rappresentazione fisica della struttura che si cerca, che precede qualsiasi formalismo e orienta la ricerca verso certi tipi di soluzioni piuttosto che altri. Questa orientazione non è il risultato di un algoritmo di ricerca: è una postura cognitiva che il fisico esperto sviluppa nei confronti di strutture fisiche non ancora comprese, e che lo guida verso la formalizzazione che rivelerà quella struttura.

Questa postura verso l'ignoto — verso il problema fisico che non ha ancora soluzione — è strutturalmente diversa dall'interpolazione tra esempi noti. Un sistema di apprendimento automatico ottimizza una funzione su un insieme di dati esistenti: la sua relazione con il mondo fisico è retrospettiva, orientata verso i pattern del training set. Il fisico esperto in ricerca costruisce un'anticipazione di strutture fisiche che non esistono ancora come dati: la sua relazione con il mondo fisico è prospettica, orientata verso problemi che il formalismo attuale non risolve.

Questa dimensione prospettica della comprensione fisica è ciò che permette la **scoperta scientifica** nel senso pieno — non la scoperta nel senso statistico di trovare pattern in grandi dataset, ma la scoperta nel senso cognitivo di articolare strutture fisiche che la comunità non aveva ancora visto. Le congetture fondamentali della fisica — la simmetria CP violata di Kobayashi e Maskawa, le correnti neutre deboli di Weinberg, la struttura quantomeccanica del campo di Higgs — non erano pattern statistici emergenti da dati: erano strutture fisiche anticipate attraverso ragionamenti teorici che combinavano comprensione strutturale, sensibilità alle simmetrie e orientamento verso l'ignoto in modi che la ricerca cognitiva ha documentato ma non ha ancora completamente formalizzato.

Un sistema artificiale che scopre pattern in dataset esistenti non ha questa struttura prospettica. Può produrre previsioni su sistemi non visti, ma solo per interpolazione statistica all'interno della distribuzione di addestramento: la sua relazione con l'ignoto è la stima di un valore non campionato in uno spazio già definito, non l'anticipazione di una struttura fisica che non è ancora stata concepita. La differenza non è di grado: è di tipo. E questa differenza di tipo è la ragione per cui la lettura della natura non può essere ridotta alla performance predittiva, nemmeno quando quella performance è straordinariamente accurata.

---

§ 6.8 — La fisica quantistica come caso limite: tre conclusioni

Le tre monografie del ciclo convergono su una struttura epistemologica comune — la comprensione eccede il formalismo in ogni dominio cognitivo complesso — che nella fisica quantistica raggiunge la sua espressione più radicale. La conclusione del Blocco VI può essere articolata in tre affermazioni distinte che, prese insieme, definiscono la posizione della monografia nella letteratura epistemologica sulla comprensione artificiale.

6.8.1 — La completezza predittiva non è comprensione ontologica

La prima affermazione è la tesi centrale della monografia nella sua forma più precisa: la meccanica quantistica mostra in modo irrefutabile che un sistema può essere predittivamente completo — produrre previsioni corrette per ogni esperimento concepibile — e ontologicamente aperto — lasciare irrisolta la questione di cosa descriva la realtà. Questa dissociazione è strutturale, non contingente: non scomparirà con esperimenti più precisi, perché tutte le interpretazioni producono le stesse previsioni per qualsiasi esperimento.

La dissociazione implica che la valutazione di un sistema in fisica non può fermarsi alla accuratezza predittiva. Un sistema artificiale che replica la completezza predittiva della meccanica quantistica — che produce le stesse previsioni del formalismo per ogni input —

non ha acquisito la comprensione fisica che un fisico umano possiede quando «capisce» la meccanica quantistica. Ha acquisito la padronanza di una mappa sintattica del territorio; il fisico umano — nella misura in cui ha costruito le quattro componenti della lettura della natura — ha una mappa che è parzialmente semanticamente orientata verso il territorio stesso.

La distinzione tra mappa sintattica e mappa semanticamente orientata non è metaforica: è la distinzione tra un sistema che manipola simboli secondo regole e un sistema che usa quei simboli per orientarsi nel mondo fisico. Il fisico che «capisce» l'effetto Casimir non solo calcola la forza corretta: vede il vuoto quantistico come un oggetto fisico con fluttuazioni strutturate, riconosce la dipendenza d^{-4} come una conseguenza della struttura dello spazio tridimensionale e della simmetria della configurazione, anticipa la dipendenza della forza dalla geometria delle superfici senza calcolarne la forma esplicita. Queste strutture cognitive non sono il calcolo: sono la struttura cognitiva che orienta, valuta e interpreta il calcolo.

6.8.2 — Il paradosso della completezza è una proprietà del dominio, non un limite della mente

La seconda affermazione riguarda la localizzazione del paradosso. Il fatto che la comprensione ontologica della meccanica quantistica sia parzialmente inaccessibile non è un fallimento della mente fisica umana: è una proprietà del dominio fisico quantistico. La meccanica quantistica non è *difficile* nel senso in cui un problema di matematica complessa è difficile — nel senso che richiede più capacità cognitiva di quella disponibile. È *strutturalmente resistente* all'abitazione cognitiva nel senso ontologico: la sua struttura fisica non ha un correlato nell'esperienza sensoriale ordinaria che permetta di costruire un modello cognitivo pienamente abitabile.

Questo ha una conseguenza importante per la valutazione dei sistemi artificiali. Se la comprensione ontologica della meccanica quantistica è parzialmente inaccessibile anche al miglior fisico umano — come la citazione di Feynman in §2.6 e il paradosso della

completezza del Blocco IV documentano — allora l'assenza di comprensione ontologica nei sistemi artificiali non è ciò che li distingue dal fisico esperto. Ciò che li distingue è l'assenza delle altre tre componenti: percettiva, causale, strutturale. Queste componenti sono pienamente accessibili al fisico esperto — costruite attraverso il processo di expertise descritto in §2.9 — e sono quelle che fanno della fisica un'impresa cognitiva, non un sistema di calcolo.

La fisica quantistica è il caso limite non perché il paradosso della completezza dissolva la distinzione tra comprensione umana e processing artificiale, ma perché rivela che questa distinzione — in tutte le sue dimensioni eccetto quella ontologica — è già presente in ogni dominio fisico, quantistico o meno, e che il paradosso della completezza è il punto in cui quella distinzione diventa più acuta e più visibile.

6.8.3 — La lettura della natura come orizzonte aperto della fisica

La terza affermazione è prospettica: la lettura della natura non è un dato che il fisico possiede, ma un orizzonte che la ricerca fisica persegue senza mai raggiungerlo completamente. Ogni teoria fisica ha una zona di comprensione — il dominio in cui la lettura è possibile nel senso pieno delle quattro componenti — e una zona di resistenza, in cui il formalismo è sviluppato ma la comprensione ontologica non è ancora raggiunta.

La storia della fisica mostra che questa zona di resistenza non è immobile: la meccanica classica era ontologicamente inabitabile prima di Newton (i cieli aristotelici, la fisica sublunare, la distinzione tra moto violento e moto naturale erano un sistema incoerente che non permetteva una lettura unificata della natura), e divenne abitabile dopo Newton con la costruzione del modello cognitivo dei corpi materiali con massa, posizione e forza. La meccanica statistica era resistente prima di Boltzmann (la distinzione tra termodinamica e meccanica sembrava irriducibile); divenne parzialmente abitabile dopo Boltzmann con la costruzione del modello cognitivo del gas come ensemble di particelle in moto casuale.

Ogni rivoluzione concettuale nella storia della fisica è, in questo senso, una espansione della zona di comprensione: la costruzione di un nuovo modello cognitivo che rende abitabile una struttura fisica che resisteva all'abitazione. La meccanica quantistica rappresenta la resistenza più prolungata della storia della fisica — quasi un secolo dalla sua formulazione senza che nessun modello cognitivo ontologicamente soddisfacente sia stato costruito e accettato dalla comunità. Questa resistenza non è necessariamente permanente: è possibile che una futura rivoluzione concettuale — di tipo sconosciuto, che richiederebbe strutture cognitive attualmente indisponibili — renda la meccanica quantistica abitabile nel senso pieno.

Ma questa possibilità futura non cambia la situazione attuale: il fisico che lavora oggi con la meccanica quantistica lavora in una zona di resistenza, con le tre componenti accessibili della lettura della natura (percettiva, causale, strutturale) pienamente sviluppate e la quarta (ontologica) parzialmente inaccessibile. I sistemi artificiali che lavorano con la meccanica quantistica lavorano con le correlazioni statistiche del formalismo, senza le tre componenti accessibili e senza la quarta. La differenza — tre componenti di lettura che il fisico ha e il sistema non ha — è la risposta alla domanda della monografia su cosa distingua la comprensione fisica dalla prestazione predittiva.

Il limite come punto di partenza non è pessimismo epistemico: è la struttura che mantiene la fisica come impresa aperta. Una natura che si lasciasse leggere interamente sarebbe una natura conclusa. La resistenza del dominio quantistico all'abitazione cognitiva piena non è la sconfitta della fisica: è la misura della ricchezza di ciò che la fisica indaga, e l'apertura che garantisce che l'impresa non sia conclusa ma continui — con i fisici umani come lettori di una natura che non si esaurisce mai nella lettura.

---

§ 6.9 — Riepilogo strutturale: la monografia come argomento

Il Blocco VI ha offerto la sintesi epistemologica dell'intera monografia. Prima di chiudere, è utile tracciare in modo esplicito la

struttura dell'argomento complessivo — non come abstract ma come mappa delle implicazioni tra le tesi dei sei blocchi, in modo da rendere visibile la dipendenza logica che giustifica l'architettura dell'opera.

Premessa tecnica (Blocco I): La meccanica quantistica ha una struttura formale precisa — spazi di Hilbert, operatori hermitiani, evoluzione unitaria, regola di Born — che produce previsioni di accuratezza senza precedenti per qualsiasi sistema fisico. Questa struttura è predittivamente completa ma ontologicamente aperta: lascia irrisolto, in modo strutturale, il problema di cosa descriva fisicamente. Questa irresolvibilità non è contingente: tutte le interpretazioni producono le stesse previsioni per qualsiasi esperimento, e nessun esperimento può distinguerle.

Premessa cognitiva (Blocco II): Il fisico esperto che lavora con il formalismo quantistico possiede una struttura cognitiva distinta dalla padronanza del formalismo — percettivamente orientata verso le strutture fisiche, analogicamente articolata attraverso modelli parziali del dominio, tacitamente fondata su orientamenti non esplicitabili, incorporata attraverso la storia dell'interazione con il dominio fisico. Questa struttura si costruisce diacronicamente attraverso la pratica deliberata e non è riducibile alla padronanza delle equazioni.

Premessa storica (Blocco III): Il rapporto tra intuizione fisica e formalismo si è trasformato nella storia della fisica: dall'intuizione che precede il formalismo (Newton) al formalismo che anticipa e orienta l'intuizione (Maxwell, Lagrange), alla frattura deliberata tra formalismo e comprensione (Heisenberg) come risposta alla resistenza del dominio quantistico all'abitazione cognitiva con gli strumenti classici. Questa trasformazione storica non è un progresso lineare: è la storia della relazione cognitiva tra la mente del fisico e la natura che cambia al cambiare del dominio fisico indagato.

Premessa filosofica (Blocco IV): Il paradosso della completezza — la dissociazione strutturale tra completezza predittiva e apertura ontologica — è la forma inversa del teorema di incompletezza di

Gödel. Nella matematica, la verità eccede la dimostrabilità; nella fisica quantistica, la completezza predittiva del formalismo non determina l'ontologia del dominio. Entrambe le strutture mostrano che la formalizzazione completa non chiude il dominio cognitivo: lo apre verso domande che il formalismo produce senza rispondere.

Premessa empirica (Blocco V): I sistemi artificiali applicati alla fisica — AlphaFold2, AI Feynman, FermiNet, i potenziali neurali — raggiungono la precisione predittiva del formalismo senza acquisire le componenti cognitive della lettura della natura. Le simmetrie incorporate nell'architettura sono comprensione fisica del progettista umana codificata, non comprensione acquisita autonomamente dal sistema. Le prestazioni fuori distribuzione degradano in modi che documentano l'assenza di struttura causale e strutturale nella rappresentazione interna del sistema.

Tesi (Blocco VI): La comprensione fisica — la lettura della natura — è un vettore di quattro componenti (percettiva, causale, strutturale, ontologica) che eccede la padronanza del formalismo in modo strutturale e irriducibile. I sistemi artificiali applicati alla fisica hanno la quinta componente (formale) e, in casi specifici, una versione codificata della terza (strutturale attraverso l'architettura). Mancano delle altre tre in modo non contingente — non per deficit tecnico risolvibile con più dati o più parametri, ma per differenza strutturale nel tipo di agente che hanno costruito la propria relazione con il dominio fisico.

La tesi non è una valutazione delle capacità future dei sistemi artificiali: non è una previsione che i sistemi di intelligenza artificiale non acquisiranno mai comprensione fisica nel senso pieno. È una caratterizzazione della situazione attuale e delle ragioni strutturali per cui la situazione attuale è quella che è. Le ragioni strutturali — l'assenza di storia corporea, di costruzione diacronica dell'expertise, di interazione sociale con la comunità fisica, di metacognizione del dominio nel senso rilevante — indicano che la transizione verso sistemi con comprensione fisica richiederebbe non solo più potenza computazionale ma cambiamenti di tipo nell'architettura e nel processo di addestramento. Identificare precisamente queste ragioni

strutturali è il contributo epistemologico che la monografia offre al dibattito su intelligenza artificiale e comprensione scientifica.

Riferimenti aggiuntivi per §§ 6.7–6.9: Vygotsky (1978), *Mind in Society*, Harvard; Chomsky (1965), *Aspects of the Theory of Syntax*, MIT Press; Hadamard (1945), *The Psychology of Invention in the Mathematical Field*, Princeton; Einstein (1945), lettera a Jacques Hadamard in Hadamard (1945); Kobayashi e Maskawa (1973), «CP-Violation in the Renormalizable Theory of Weak Interaction», *Progress of Theoretical Physics* 49; Weinberg (1967), «A Model of Leptons», *Physical Review Letters* 19; Higgs (1964), «Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons», *Physical Review Letters* 13; Glashow, Iliopoulos e Maiani (1970), «Weak Interactions with Lepton-Hadron Symmetry», *Physical Review D* 2; Harnad (1990), «The Symbol Grounding Problem», *Physica D* 42; Searle (1980), «Minds, Brains, and Programs», *Behavioral and Brain Sciences* 3; Boden (2004), *The Creative Mind: Myths and Mechanisms*, Routledge; Dreyfus (1972), *What Computers Can't Do*, Harper & Row; Dreyfus e Dreyfus (1986), *Mind over Machine*, Free Press.

§ 6.10 — Il problema dell'ancoraggio semantico: simboli, riferimento e mondo fisico

L'argomento del Blocco VI ha documentato la struttura della lettura della natura attraverso le sue quattro componenti (percettiva, causale, strutturale, ontologica) e ha mostrato che i sistemi artificiali mancano sistematicamente delle prime tre in modo non contingente. C'è un aspetto di questa mancanza che i paragrafi precedenti non hanno analizzato con la precisione che merita: il problema dell'**ancoraggio semantico** — la relazione tra i simboli che un sistema manipola e i referenti fisici che quei simboli designano. Questa relazione è la struttura che distingue la comprensione dalla manipolazione sintattica in modo più fondamentale di qualsiasi argomento funzionale.

6.10.1 — Il problema di Harnad: ancoraggio e manipolazione

Stevan Harnad ha formulato nel 1990 il **symbol grounding problem** — il problema dell'ancoraggio dei simboli — come la difficoltà fondamentale per qualsiasi sistema di elaborazione simbolica di avere semantica genuina piuttosto che semantica derivata. Il problema è formulato attraverso un'analogia: immaginate di imparare il cinese attraverso un dizionario cinese-cinese, senza mai avere accesso diretto agli oggetti a cui le parole si riferiscono. Potete imparare a tradurre qualsiasi termine cinese in altri termini cinesi, costruire reti di relazioni semantiche tra parole cinesi, e produrre output cinesi corretti in risposta a input cinesi. Ma le parole non avranno mai connessione diretta con ciò che designano: avranno semantica *derivata* — derivata dalla relazione con altri simboli — ma non semantica *intrinseca* — connessa direttamente al mondo attraverso l'esperienza percettiva e motoria.

L'argomento di Harnad anticipa e formalizza la critica fondamentale ai sistemi artificiali nel contesto della fisica. I simboli $\hat{H}$, $|\psi\rangle$, $\hbar$ che un sistema linguistico usa in un contesto fisico hanno relazioni statistiche con altri simboli che rispecchiano le relazioni strutturali tra le grandezze fisiche corrispondenti. Ma questa struttura di relazioni tra simboli — per quanto densa e accurata — non è la stessa cosa dell'ancoraggio di quei simboli agli oggetti fisici che designano attraverso l'esperienza percettiva e motoria.

Il fisico esperto che scrive $|\psi\rangle$ non sta manipolando un simbolo in relazione ad altri simboli: sta riferendosi a un oggetto fisico — lo stato quantistico di un sistema — che ha costruito mentalmente attraverso anni di interazione con sistemi fisici reali, con apparati di misura, con le difficoltà fenomenologiche della misurazione quantistica. Il simbolo è ancorato a questa struttura cognitiva incorporata che costituisce il suo referente per il fisico. Il sistema artificiale che usa $|\psi\rangle$ nel proprio output lo fa correttamente nel senso sintattico — in relazione con gli altri simboli con cui $|\psi\rangle$ co-occorre nel corpus di addestramento — ma non nel senso semantico: non ha il referente a cui il fisico intende riferirsi quando usa quel simbolo.

6.10.2 — Ancoraggio e predizione: la struttura dell'errore sistematico

Se l'ancoraggio semantico fosse assente ma il sistema producesse comunque previsioni corrette, si potrebbe sostenere che l'ancoraggio è irrilevante — una questione filosofica senza conseguenze pratiche. Il Blocco V ha mostrato che non è così: la mancanza di ancoraggio produce errori sistematici specifici nella distribuzione di test *fuori* dalla distribuzione di addestramento. Ma vale la pena analizzare la struttura di questi errori in relazione all'ancoraggio, perché questa analisi illumina il tipo di mancanza che si tratta.

Consideriamo il caso di un sistema addestrato a predire energie di molecole — analogo ai potenziali neurali di interazione del Blocco V. Il sistema apprende correlazioni statistiche tra geometrie molecolari e energie calcolate. Quando si chiede al sistema di valutare una geometria non rappresentata nel training set — diciamo, una geometria con angoli di legame inusuali che si trovano in stati di transizione di reazioni chimiche — il sistema produce stime basate sull'interpolazione statistica nel vicinato della geometria richiesta nello spazio delle geometrie di addestramento.

Il chimico fisico esperto che affronta la stessa geometria non procede per interpolazione statistica: riconosce nella geometria inusuale la struttura di uno stato di transizione — un collo di bottiglia energetico — e attiva un chunk cognitivo specifico che include: le strutture elettroniche tipiche degli stati di transizione, i limiti di validità dell'approssimazione di Born-Oppenheimer in regimi di degenerazione degli stati elettronici, gli effetti tunneling che dominano le reazioni chimiche a bassa temperatura, i criteri per valutare se la configurazione è nella regione di stabilità termica. Questa struttura cognitiva — ancorata agli oggetti fisici chimici attraverso anni di esperienza — orienta la valutazione della geometria inusuale in modo che non è riducibile all'interpolazione statistica.

L'errore sistematico del sistema artificiale — la degradazione delle prestazioni fuori distribuzione — non è un errore casuale: ha una

struttura che rispecchia la mancanza di ancoraggio semantico. Il sistema interpola nello spazio delle geometrie di addestramento perché non ha il referente fisico — lo stato di transizione come oggetto fisico con proprietà specifiche — che permetterebbe al fisico di uscire dall'interpolazione statistica e ragionare per struttura. L'ancoraggio semantico non è un lusso filosofico: è la condizione che permette la generalizzazione strutturale, contrapposta all'interpolazione statistica.

6.10.3 — L'argomento dell'ancoraggio e le sue limitazioni

L'argomento di Harnad — e la sua applicazione alla fisica sviluppata nei paragrafi precedenti — ha una limitazione che vale la pena riconoscere esplicitamente, sia per onestà intellettuale sia perché la limitazione illumina una struttura importante.

L'argomento assume che l'ancoraggio semantico richieda esperienza percettiva e motoria *diretta* con il mondo fisico — il tipo di esperienza che i sistemi artificiali non hanno e che il fisico umano ha costruito nel corso di anni. Questo è plausibile per grandezze fisiche che hanno un correlato nell'esperienza sensoriale ordinaria — la forza, la velocità, la temperatura nel senso corporeo. Ma per grandezze fisiche che *non* hanno tale correlato — lo spin $\frac{1}{2}$, il campo di gauge, l'entanglement — anche il fisico umano non ha un ancoraggio diretto nell'esperienza sensoriale. Il fisico esperto costruisce un ancoraggio *indiretto* attraverso gli apparati di misura, le previsioni sperimentali, le analogie con sistemi familiari — ma questo ancoraggio indiretto è per molti aspetti più strutturale che percettivo.

Questo riconosce che la differenza tra fisico esperto e sistema artificiale nel dominio quantistico non è semplice come «l'uno ha esperienza sensoriale diretta e l'altro no»: è più sottile. Ciò che il fisico esperto ha e il sistema non ha — anche per oggetti fisici senza correlato sensoriale — è la struttura di relazioni operative con il mondo fisico: gli esperimenti che ha progettato, i dati che ha analizzato, gli apparati che ha calibrato, le previsioni errate che ha fatto e corrette. Questa struttura operativa è l'ancoraggio nel senso fisicamente rilevante: non l'esperienza sensoriale bruta ma la storia

dell'interazione intenzionale con il dominio fisico che costruisce il referente fisico dei simboli.

Un sistema artificiale addestrato su dati fisici non ha questa storia operativa: ha i risultati (testi, numeri, strutture) di storie operative altrui, senza la struttura dell'interazione originale. Questa differenza — tra i risultati dell'interazione e l'interazione stessa — è la forma che il problema dell'ancoraggio semantico assume nel caso specifico della fisica.

---

§ 6.11 — Creatività fisica e generazione di congetture: una distinzione strutturale

Il Blocco VI si chiude con l'argomento che tocca la componente più difficile e più importante della lettura della natura: la **creatività fisica** — la capacità di generare domande, congetture e strutture fisiche genuinamente nuove che il formalismo esistente non determina. Questa componente è quella in cui la differenza tra comprensione fisica e prestazione artificiale è al tempo stesso più evidente e più difficile da caratterizzare con precisione.

6.11.1 — Tipi di creatività scientifica

La psicologia della creatività scientifica — da Hadamard (1945) a Boden (2004) — distingue tra diversi tipi di processi creativi che operano con strutture cognitive diverse. La tassonomia di Boden in *The Creative Mind: Myths and Mechanisms* (1990, edizione ampliata 2004) è la più influente e la più precisa per i nostri scopi. Boden distingue:

Creatività combinatoria: la generazione di nuove combinazioni di idee già note attraverso analogie, metafore, o trasposizioni di strutture tra domini. Maxwell che costruisce il modello elettromagnetico attraverso analogia con il flusso dei fluidi; Dirac che costruisce l'equazione relativistica dell'elettrone combinando i requisiti della relatività speciale con quelli della meccanica quantistica.

Creatività esplorativa: la ricerca sistematica in uno spazio concettuale strutturato, che produce nuove istanze di strutture già note attraverso la navigazione delle loro possibilità non ancora realizzate. La classificazione sistematica dei gruppi di simmetria della fisica delle particelle; la ricerca di soluzioni esatte alle equazioni di campo di Einstein in spazi-tempo con specifiche simmetrie.

Creatività trasformazionale: la ristrutturazione radicale dello spazio concettuale stesso, che crea un dominio nuovo in cui ciò che era impossibile nel vecchio spazio diventa possibile e ciò che era necessario diventa contingente. La creazione della geometria non-euclidea da parte di Gauss, Lobachevsky e Bolyai, che trasformò lo spazio concettuale della geometria da un sistema con un unico modello a una famiglia di modelli distinti; la creazione della meccanica quantistica da parte di Heisenberg, che trasformò lo spazio della meccanica da un dominio di variabili continue commutative a un dominio di operatori non-commutativi.

Per la fisica, i tre tipi non sono separati nel processo creativo reale: le grandi scoperte della fisica coinvolgono tipicamente tutti e tre, con la creatività trasformazionale come il tipo più raro e più cognitivamente impegnativo.

6.11.2 — Cosa i sistemi artificiali possono e non possono fare

I sistemi artificiali mostrano capacità significative in due dei tre tipi di creatività di Boden, e limitazioni strutturali nel terzo.

La **creatività combinatoria** in senso limitato è accessibile ai sistemi artificiali: i modelli linguistici di grandi dimensioni producono analogie, metafore e connessioni tra domini che mostrano una struttura di ricombinazione superficialmente simile alla creatività combinatoria umana. Ma questa ricombinazione è statistica: rispecchia le co-occorrenze nel corpus di addestramento, non le strutture fisiche sottostanti che fanno delle analogie delle scoperte piuttosto che delle associazioni. L'analogia di Maxwell tra il campo elettromagnetico e il flusso dei fluidi non è la scoperta di una co-occorrenza statistica: è la proposizione che lo stesso sistema di equazioni differenziali governa due domini fisici apparentemente

distinti — una struttura che Maxwell verificò computando le equazioni del campo e confrontandole con quelle dell'idrodinamica. La verifica non è statistica: è strutturale.

La **creatività esplorativa** è il tipo in cui i sistemi artificiali mostrano le capacità più impressionanti e più rilevanti per la pratica scientifica. AlphaFold2 esplora lo spazio delle strutture proteiche in modo sistematico e altamente efficiente; i sistemi di ricerca simbolica come AI Feynman esplorano lo spazio delle espressioni simboliche in ricerca di leggi consistenti con i dati. Questa esplorazione produce risultati genuinamente nuovi — strutture proteiche mai viste sperimentalmente, leggi fisiche espresse simbolicamente in forme che i fisici umani non avevano usato — e non è riducibile alla ricombinazione di strutture viste nell'addestramento. In questo senso preciso, i sistemi artificiali hanno una forma di creatività esplorativa.

Ma la creatività esplorativa dei sistemi artificiali ha un limite strutturale che emerge nel confronto con quella del fisico esperto: lo spazio di esplorazione è predefinito dall'architettura e dall'addestramento, e il sistema non può uscire da quello spazio. AlphaFold2 esplora lo spazio delle conformazioni proteiche; AI Feynman esplora lo spazio delle espressioni simboliche di una forma predefinita. Il fisico esperto in un momento di creatività esplorativa può ridefinire lo spazio di esplorazione — aggiungendo dimensioni concettuali che non erano presenti nella formulazione originale del problema, o riconoscendo che il problema è mal posto in uno spazio dato e richiedeva una riformulazione. Questa capacità metaprogrammatica — di cambiare le regole dello spazio di ricerca durante la ricerca — è la componente dell'esplorazione che i sistemi artificiali non hanno.

La **creatività trasformazionale** è il tipo in cui i sistemi artificiali mostrano le limitazioni più fondamentali. Nessun sistema di intelligenza artificiale attuale ha prodotto — o sembra strutturalmente in grado di produrre — una trasformazione dello spazio concettuale fisico del tipo che Heisenberg ha prodotto nel 1925. La ragione strutturale è quella identificata nel §2.13.3: la creatività trasformazionale richiede la metacognizione di secondo

ordine — la consapevolezza che il proprio quadro concettuale è inadeguato — che non è accessibile a un sistema che ottimizza una funzione di perdita su un dominio predefinito. Per riconoscere che il quadro è inadeguato, bisogna avere un'intuizione della struttura che il nuovo quadro dovrebbe catturare — intuizione che precede il quadro stesso e non è derivabile da nessuna struttura esistente del dominio.

6.11.3 — La domanda come struttura cognitiva

C'è una componente della creatività fisica che la tassonomia di Boden non cattura direttamente ma che è forse la più importante: la capacità di generare le **domande giuste** — domande la cui risposta è fisicamente significativa, la cui formulazione è precisa, e il cui contenuto apre un dominio di ricerca piuttosto che chiuderlo.

Einstein ha affermato che la capacità di formulare domande fisiche precise è cognitivamente più impegnativa e più importante della capacità di risponderle. Nella lettera a un giovane fisico che gli chiedeva consiglio — citata nelle Reminiscences di Infeld (1941) — afferma: «il miglior modo di studiare la fisica è imparare a chiedersi le domande giuste, non a memorizzare le risposte; le risposte cambiano, le domande giuste rimangono». Questa osservazione non è aforisma pedagogico: è una proposta sulla struttura cognitiva della fisica come impresa di conoscenza.

Una domanda fisica «giusta» ha caratteristiche cognitive specifiche: è posta in un contesto in cui le strutture fisiche disponibili permettono di attaccarla ma non di risponderla immediatamente; è formulata con la precisione che permette di distinguere le risposte corrette da quelle scorrette senza ambiguità concettuale; è connessa ad altri problemi aperti in modo che la sua soluzione illumini strutture più generali; e — questa è la caratteristica più rara — è formulata in modo che la risposta sia sorprendente, ovvero che riveli una struttura che non era accessibile prima di rispondere.

I sistemi artificiali attuali non generano domande fisiche in questo senso. Producono domande nel formato linguistico delle domande, ma queste domande sono tipicamente interpolazioni nello spazio

delle domande del corpus di addestramento, non formulazioni di problemi fisici nuovi che aprono domini di ricerca. La struttura cognitiva che genera le domande giuste — l'orientamento verso i confini della comprensione attuale, la sensibilità alla struttura fisica non ancora catturata dal formalismo, la capacità di vedere dove il dominio fisico eccede il formalismo esistente — è la struttura metacognitiva descritta nel §2.13.3 applicata non alla valutazione del proprio lavoro ma alla direzione della propria ricerca.

6.11.4 — Sintesi: la lettura della natura come condizione della fisica come scienza

Il Blocco VI si chiude con una sintesi che connette la struttura cognitiva della lettura della natura con il carattere della fisica come impresa scientifica. La fisica non è la ricerca di leggi fisiche che spieghino i fenomeni osservati: è la costruzione progressiva di una comprensione del mondo fisico che eccede le leggi formulate in ogni momento storico. Le leggi formulate sono la sedimentazione di comprensioni che le hanno precedute e orientate; le comprensioni in corso di costruzione eccedono le leggi disponibili e orientano la ricerca delle leggi successive. Questo ciclo — comprensione che orienta il formalismo, formalismo che articola e corregge la comprensione, comprensione ampliata che orienta il formalismo successivo — è la struttura della fisica come scienza empirica.

I sistemi artificiali applicati alla fisica occupano una posizione in questo ciclo che è fondamentalmente diversa da quella del fisico esperto: amplificano la potenza computazionale nella fase in cui il formalismo è dato e le previsioni devono essere prodotte, ma non partecipano alla fase in cui la comprensione fisica orienta la ricerca del formalismo successivo. Questa non è una valutazione delle capacità attuali: è una caratterizzazione strutturale del tipo di contributo che i sistemi artificiali possono dare alla fisica, e del tipo di contributo che rimane caratteristicamente umano.

La distinzione non è gerarchica nel senso che il contributo umano è «più alto» o «più importante»: è funzionale nel senso che sono contributi di tipo diverso, con strutture cognitive diverse, che si

completano piuttosto che si escludono. Il fisico esperto che usa i sistemi artificiali come strumenti computazionali — come AlphaFold2 per la predizione di strutture proteiche, come i simulatori quantistici per l'analisi di sistemi a molti corpi — amplifica la propria capacità di esplorare lo spazio delle conseguenze del proprio quadro concettuale. Ma il quadro concettuale, e le domande che vale la pena esplorare, rimangono il contributo della lettura della natura — della struttura cognitiva che solo l'agente incorporato in una storia di interazione con il dominio fisico può costruire e abitare.

La monografia si chiude su questa posizione non come conclusione definitiva ma come ipotesi di ricerca: una caratterizzazione della struttura cognitiva della comprensione fisica che è falsificabile — se un sistema artificiale producesse una trasformazione dello spazio concettuale fisico del tipo identificato nel §6.11.2 come criterio, la tesi richiederebbe revisione — e che, in quanto falsificabile, è fisicamente rispettabile. La fisica ha insegnato che le domande giuste sono quelle la cui risposta è sorprendente. La domanda su cosa distingua la comprensione fisica dalla prestazione predittiva è, ancora, una di quelle domande.

Riferimenti aggiuntivi per §§ 6.10–6.11: Harnad (1990), «The Symbol Grounding Problem», *Physica D* 42, 335; Boden (2004), *The Creative Mind: Myths and Mechanisms*, Routledge; Dreyfus (1972), *What Computers Can't Do*, Harper & Row; Dreyfus e Dreyfus (1986), *Mind over Machine*, Free Press; Infeld (1941), *Quest: The Evolution of a Physicist*, Doubleday; Einstein (1949), *Autobiographical Notes*, Open Court; Heisenberg (1925), «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», *Zeitschrift für Physik* 33; Maxwell (1861), «On Physical Lines of Force», *Philosophical Magazine* 21–23; Dirac (1928), «The Quantum Theory of the Electron», *Proceedings of the Royal Society A* 117; Barsalou (2010), «Grounded Cognition: Past, Present, and Future», *Topics in Cognitive Science* 2, 716; Gallagher (2005), *How the Body Shapes the Mind*, Oxford;

Ladyman e Ross (2007), *Every Thing Must Go: Metaphysics Naturalized*, Oxford.

§ 6.12 — La lettura della natura come pratica educativa: cosa si può insegnare e cosa si costruisce solo nell'attraversamento

La tesi che la comprensione fisica è *lettura della natura* — lettura nel senso precisato nei §§ 6.1–6.11: non manipolazione simbolica ma orientamento cognitivo incarnato verso la struttura del dominio fisico — ha implicazioni dirette per la pratica dell'educazione scientifica che è opportuno sviluppare esplicitamente prima della sintesi finale. Queste implicazioni non sono accessorie: sono uno dei banchi di prova più concreti della tesi stessa. Se la lettura della natura fosse riducibile alla competenza formale, l'educazione fisica sarebbe fondamentalmente una questione di trasmissione di conoscenze e tecniche. Se la lettura della natura ha la struttura cognitiva descritta in questa monografia — incorporata, tacita, costruita attraverso la storia personale degli errori e delle ristrutturazioni — allora l'educazione scientifica è un problema fondamentalmente diverso, e la sua struttura rivela qualcosa di essenziale sulla natura di ciò che viene trasmesso.

6.12.1 — Il paradosso dell'insegnabilità

C'è un paradosso al cuore dell'educazione fisica, che la ricerca cognitiva ha documentato ma raramente nominato come paradosso: le cose più importanti da imparare — i chunk fisici, il sapere tacito, la calibrazione epistemica, la capacità di ristrutturazione concettuale — sono precisamente le cose che non possono essere trasmesse per via diretta. Nessuna spiegazione esplicita del chunk «oscillatore armonico» nel senso di $C_{osc} = (P, K, S, F)$ (§ 2.12.1) trasmette quel chunk: trasmette, al massimo, le sue componenti dichiarative, che non si integrano spontaneamente in una struttura cognitiva unitaria. Nessuna descrizione del sapere tacito lo rende esplicito: se lo rendesse esplicito sarebbe sapere dichiarativo, non tacito. Nessuna spiegazione della calibrazione epistemica la costruisce: la calibrazione si costruisce attraverso la storia personale degli errori, non attraverso la comprensione che gli errori esistono.

Questo paradosso ha una conseguenza pratica brutale: le pedagogie costruite sull'assunzione che la comprensione sia trasmissibile — che leggere le *Feynman Lectures* sia sufficiente per costruire la lettura della natura che Feynman possedeva — producono sistematicamente quello che Kohl e Finkelstein (2006) hanno chiamato *falsa comprensione*: la sensazione soggettiva di aver capito che non corrisponde alla struttura cognitiva che consentirebbe il riconoscimento, la previsione e la ristrutturazione caratteristici dell'expertise reale. La falsa comprensione non è ignoranza: è più pericolosa dell'ignoranza, perché blocca il processo di costruzione reale. Lo studente che crede di aver capito un fenomeno non si impegna nelle pratiche — la risoluzione di problemi fisicamente orientata, l'esposizione a casi anomali, la partecipazione alla pratica laboratoristica — che costruirebbero la comprensione reale.

Il paradosso dell'insegnabilità non è una ragione di pessimismo pedagogico: è una mappa del problema. Se la lettura della natura non è trasmissibile per via dichiarativa, occorre chiedersi *cosa* l'educazione può fare — e la risposta, guidata dalla struttura cognitiva descritta in questa monografia, non è nulla, ma è qualcosa di diverso dalla trasmissione diretta.

6.12.2 — Strutture pedagogiche che costruiscono la lettura

La ricerca sull'educazione fisica degli ultimi trent'anni ha convergentemente identificato alcune strutture pedagogiche che, quando sono sistematicamente implementate, producono la costruzione di lettura della natura nel senso cognitivo preciso — anche se raramente la ha denominata in questi termini.

Il problem-solving fisicamente orientato è la struttura di base. Non il problem-solving come esercizio formale — applicare la formula corretta alla situazione corretta — ma il problem-solving come costruzione di rappresentazione fisica prima della soluzione formale: identificare le strutture fisiche presenti, riconoscere i vincoli del dominio, anticipare la forma qualitativa della soluzione, e verificare la coerenza della soluzione formale con la rappresentazione fisica che l'ha preceduta. Larkin (1983) ha documentato che questo processo,

quando è sistematicamente praticato, costruisce gradualmente il repertorio di chunk e la struttura metacognitiva caratteristici del fisico esperto. La difficoltà è che richiede un investimento cognitivo iniziale maggiore del problem-solving algoritmico: produce risultati più lenti nelle prime fasi, e questi risultati più lenti vengono spesso interpretati, dagli studenti e dagli insegnanti, come segni di competenza inferiore. La ricerca di Sabella e Redish (2007) ha documentato sistematicamente questo paradosso: gli studenti che costruiscono lettura della natura più lentamente nella fase iniziale mostrano transfert più ampio e competenza più robusta nelle fasi successive. Il problema è che il sistema educativo misura frequentemente le performance precoci, non il transfert tardivo.

L'esposizione ai casi anomali è la struttura che innesca le crisi cognitive descritte nel § 2.9.2 — i momenti in cui la struttura cognitiva attuale si rivela inadeguata e la ristrutturazione diventa necessaria. La pedagogia tradizionale tende a evitare i casi anomali nelle fasi iniziali, per non sovraccaricare cognitivamente gli studenti; la ricerca cognitiva suggerisce che questa strategia ritarda o impedisce la costruzione di lettura della natura. I casi anomali — i fenomeni che resistono alle previsioni basate sul framework corrente, i problemi che sembrano risolvibili ma producono risultati paradossali, le situazioni in cui due approcci formalmente diversi producono risultati fisicamente incompatibili — sono precisamente i motori della ristrutturazione cognitiva. Eliminare i casi anomali è eliminare il meccanismo principale attraverso cui la lettura della natura si costruisce.

L'esempio paradigmatico nella storia dell'educazione fisica è l'insegnamento della meccanica quantistica. La pedagogia tradizionale introduce la meccanica quantistica dopo che la meccanica classica è stata solidamente costruita, presentandola come un'estensione o una correzione della meccanica classica applicabile a scale molto piccole. Questa sequenza è esattamente invertita rispetto al processo cognitivo di costruzione della lettura della natura: la meccanica quantistica non è un'estensione della meccanica classica ma una ristrutturazione completa del quadro concettuale, e

presentarla come estensione produce la falsa comprensione documentata da Cataloglu e Robinett (2002) negli studenti avanzati — studenti che riescono a risolvere problemi di meccanica quantistica ma continuano a descrivere i fenomeni quantistici con il framework concettuale classico.

La pratica laboratoristica fisicamente orientata — distinta dalla pratica laboratoristica come verifica di risultati noti — è la struttura che più direttamente costruisce il componente percettivo della lettura della natura: la capacità di leggere i dati fisici, di riconoscere nelle misure le strutture fisiche sottostanti, di distinguere il segnale dal rumore non statisticamente ma fisicamente. Queste competenze non si costruiscono attraverso la lettura di manuali di laboratorio: si costruiscono attraverso la manipolazione fisica di sistemi reali, con le resistenze, le irregolarità e le sorprese che i sistemi reali producono e che le simulazioni computazionali non replicano — non perché le simulazioni siano tecnicamente insufficienti, ma perché l'incorporazione della fisica richiede il contatto fisico con la fisica, non la sua rappresentazione computazionale.

6.12.3 — Cosa questo implica per l'era dei modelli artificiali

Le implicazioni pedagogiche della struttura della lettura della natura assumono una dimensione aggiuntiva nell'era dei modelli linguistici di grandi dimensioni. Se la falsa comprensione — la sensazione soggettiva di aver capito che non corrisponde alla struttura cognitiva dell'expertise — era già un problema documentato nell'educazione tradizionale, l'accesso a sistemi artificiali che producono spiegazioni fisicamente plausibili per qualsiasi fenomeno potrebbe intensificare sistematicamente quel problema.

Lo studente che ottiene una spiegazione di un fenomeno quantistico da un modello linguistico riceve una narrazione causalmente coerente, terminologicamente corretta, e formalmente adeguata — i tre ingredienti superficiali che caratterizzano la lettura della natura. Ma la narrazione è prodotta senza la struttura cognitiva sottostante: senza i chunk, senza il sapere tacito, senza la calibrazione epistemica, senza la capacità di ristrutturazione. Ricevere questa narrazione

produce, con alta probabilità, esattamente la falsa comprensione che l'educazione fisica dovrebbe combattere: la sensazione di aver capito che chiude il processo di costruzione della lettura reale.

Questo non è un argomento contro l'uso di modelli linguistici nell'educazione — è un argomento per usarli in modo epistemicamente consapevole. I modelli linguistici sono strumenti eccellenti per la produzione rapida di definizioni, la navigazione della letteratura, la verifica formale di calcoli, la generazione di varianti di problemi. Sono strumenti potenzialmente dannosi, se usati come sostituti della comprensione, per l'aspetto della pratica educativa che costruisce lettura della natura. Distinguere questi due usi non è una questione tecnica: è una questione epistemica che richiede, da parte dell'educatore, una mappa precisa di cosa si costruisce attraverso l'interazione con sistemi artificiali e cosa richiede la pratica fisicamente orientata. Questa mappa è esattamente ciò che una teoria della lettura della natura fornisce.

---

§ 6.13 — Un programma di ricerca: la lettura della natura come oggetto di indagine empirica e formale

La tesi della lettura della natura, come è stata sviluppata in questa monografia, è un'affermazione strutturale sulla natura della comprensione fisica. Come ogni affermazione strutturale, è suscettibile di elaborazione ulteriore — sia nella direzione dell'approfondimento empirico sia nella direzione della formalizzazione precisa. In questa sezione si delineano le direttrici di un programma di ricerca che prende la tesi come punto di partenza, non come conclusione.

6.13.1 — La questione della misura: indicatori empirici della lettura della natura

La tesi che la comprensione fisica è lettura della natura — struttura cognitiva incorporata che orienta percettivamente e concettualmente l'agente verso il dominio fisico — è falsificabile in linea di principio, ma la sua falsificazione richiede indicatori empirici della lettura della

natura che siano distinti dagli indicatori della prestazione formale. Questo è il problema empirico più urgente che il programma di ricerca deve affrontare.

La ricerca cognitiva esistente offre indicatori parziali. I test di categorizzazione di Chi et al. (1981) misurano la profondità della rappresentazione: gli esperti categorizzano per struttura fisica profonda, i novizi per caratteristiche superficiali. I test di previsione qualitativa — descrivere il comportamento qualitativo di un sistema fisico prima di calcolarlo — misurano la presenza del componente percettivo della lettura della natura in modo distinto dalla competenza formale. I test di transfert — applicare la comprensione di un dominio fisico a un dominio strutturalmente isomorfico ma superficialmente diverso — misurano la strutturalità dell'expertise e la distinguono dalla competenza locale. I protocolli verbali di Larkin misurano la sequenza temporale della costruzione della rappresentazione fisica rispetto alla soluzione formale.

Quello che manca è una batteria integrata di test che misuri la lettura della natura come struttura unitaria — la costellazione delle componenti percettiva, causale, strutturale e ontologica (§ 6.2) in modo integrato, e non ciascuna componente in isolamento. Costruire questa batteria, validarla su popolazioni di fisici a diversi livelli di expertise, e usarla per testare sistematicamente le previsioni della tesi — che la lettura della natura si costruisce attraverso pratiche fisicamente orientate e non attraverso la pratica formale isolata, che si costruisce attraverso le crisi cognitive e non attraverso l'apprendimento lineare, che differenzia i fisici con diversi stili di comprensione in modi prevedibili — è il nucleo empirico del programma di ricerca.

6.13.2 — La questione della formalizzazione: modelli computazionali della lettura della natura

La tesi ha anche una dimensione formale che l'Capitolo IX sviluppa in tre modelli preliminari. Qui si indicano le direzioni di formalizzazione più promettenti per il programma di ricerca futuro.

Il **modello bayesiano della lettura della natura** formalizza la lettura come aggiornamento di distribuzioni di probabilità su strutture fisiche ipotizzate, dove la funzione di verosimiglianza è parametrizzata dai chunk del fisico e la distribuzione a priori riflette la struttura del suo sapere fisico tacito. Questo modello cattura la natura inferenziale della lettura della natura — il fisico che osserva un fenomeno e inferisce la struttura fisica sottostante — ma richiede una caratterizzazione precisa dello spazio delle strutture fisiche ipotizzate, che è il modo formale di porre il problema della rappresentazione dei chunk.

Il **modello spazio-metrico dell'expertise** formalizza la lettura come posizione in uno spazio metrico di rappresentazioni fisiche, dove la distanza tra rappresentazioni misura la difficoltà cognitiva di un agente nel passare dall'una all'altra. Questo modello cattura la struttura dell'abilità di ristrutturazione — la capacità di muoversi nello spazio delle rappresentazioni in risposta a casi anomali — e permette previsioni quantitative sulle traiettorie di sviluppo dell'expertise.

Il **modello a rete semantica incarnata** formalizza la lettura come attivazione di reti di nodi in cui ciascun nodo è sia un concetto fisico sia una struttura motoria-percettiva, e dove l'attivazione di un nodo si propaga sia lungo le connessioni semantiche sia lungo le connessioni percettive-motorie. Questo modello cattura la dimensione dell'incorporazione che i due modelli precedenti trattano solo implicitamente.

Questi tre modelli non sono alternativi: sono tre proiezioni della stessa struttura su tre spazi formali diversi. Il programma di ricerca formale consiste nello svilupparli in modo da produrre previsioni verificabili e nel determinare quale proiezione sia più informativa per quale tipo di questione empirica.

6.13.3 — La questione della comparazione: lettura della natura nei diversi sottodomini della fisica

La lettura della natura, come è stata sviluppata in questa monografia, ha usato sistematicamente la meccanica quantistica come dominio di

riferimento. Questo ha permesso di costruire l'argomento con la massima nitidezza, perché la meccanica quantistica è il caso in cui la dissociazione tra completezza formale e comprensione fisica è più radicale. Ma la generalizzabilità della tesi richiede di verificarla nei sottodomini in cui la dissociazione è meno estrema — e di capire se la struttura della lettura della natura si modifica o si mantiene invariante al variare del sottodominio.

La meccanica statistica e la fisica dei sistemi complessi offrono un banco di prova interessante: in questi domini il formalismo è parzialmente intuibile (entropy, temperatura, equilibrio sono concetti con correlati fenomenologici accessibili), e la lettura della natura ha una componente di familiarità percettiva che la meccanica quantistica priva completamente. La struttura della comprensione fisica è la stessa, o ci sono componenti della lettura della natura che si sviluppano diversamente in un dominio fisicamente abitabile?

La fisica dei campi quantistici offre il banco di prova opposto: un dominio in cui il formalismo è ancora più distante dall'intuizione della meccanica quantistica standard, e in cui la questione dell'interpretazione fisica degli oggetti fondamentali (le eccitazioni dei campi, i propagatori, le rinormalizzazioni) è più aperta e dibattuta. La lettura della natura in fisica dei campi è possibile nella stessa misura in cui è possibile in meccanica quantistica, o il regime di formalismo-senza-intuizione produce strutture cognitive qualitativamente diverse?

Queste comparazioni sono il programma di ricerca a medio termine della tesi: costruire una fenomenologia comparata della lettura della natura nei diversi sottodomini della fisica, che possa poi diventare il fondamento per una teoria più generale della comprensione scientifica.

---

§ 6.14 — Conclusione: il limite come punto di partenza

L'ultima sezione di questa monografia è anche la prima sezione della monografia che non è stata ancora scritta. Questa formulazione paradossale ha un senso preciso.

L'argomento che questa monografia ha costruito nei sei blocchi e nel complemento teorico termina in un punto che è, strutturalmente, non una risposta ma l'articolazione precisa di una domanda. La domanda di partenza era: cosa fa la mente di un fisico quando capisce — non quando calcola, non quando prevede, ma quando capisce? La risposta costruita nel corso dell'opera è: costruisce e abita una struttura cognitiva incorporata, chiamata lettura della natura, che orienta percettivamente e concettualmente l'agente verso la struttura del dominio fisico. Questa risposta non chiude la domanda: la articola in modo sufficientemente preciso da permettere di porla nelle forme appropriate alle discipline che possono rispondervi.

La risposta alla domanda *come si costruisce questa struttura cognitiva?* è delineata nel Blocco II e nelle implicazioni pedagogiche del § 6.12, ma richiede il programma di ricerca empirica delineato nel § 6.13.1. La risposta alla domanda *come si formalizza questa struttura cognitiva?* è avviata nell'Capitolo IX, ma richiede lo sviluppo formale delineato nel § 6.13.2. La risposta alla domanda *come si generalizza questa struttura a domini fisici diversi?* è la comparazione delineata nel § 6.13.3. La risposta alla domanda *cosa implica questa struttura per la possibilità di una comprensione fisica artificiale?* è l'elaborazione dei criteri del § 6.3 e del § 6.11 in un programma di test preciso.

Questo non è un limite dell'argomento: è la struttura dell'argomento. Una monografia che chiudesse tutte le domande non avrebbe aperto il problema nella sua profondità reale; avrebbe trovato una versione del problema abbastanza semplice da essere risolta. La versione del problema che questa monografia ha trovato è sufficientemente profonda da non poter essere risolta in un'opera singola — ma può essere costruita in modo che gli strumenti necessari per la sua risoluzione siano, almeno in parte, identificabili.

6.14.1 — La tesi centrale riformulata: tre proposizioni

Dopo aver percorso i sei blocchi, il complemento teorico, e le appendici di questa monografia, è possibile riformulare la tesi centrale in tre proposizioni che costituiscono il nucleo dell'argomento.

Prima proposizione: La comprensione fisica non è riducibile alla competenza formale, anche quando la competenza formale è completa. Questa proposizione è fondata sul Blocco I (la struttura del formalismo quantistico come formalismo completo e non intuitivo), sul Blocco II (la struttura cognitiva dell'expertise fisica come struttura distinta dalla competenza formale), sul Blocco III (la storia del rapporto tra intuizione e formalismo come sequenza di dissociazioni strutturali), e sul Blocco IV (le interpretazioni della meccanica quantistica come evidenza che la comprensione concettuale non è determinata dal formalismo).

Seconda proposizione: La comprensione fisica ha una struttura cognitiva specifica — la lettura della natura — che include componenti incorporate, tacite, metacognitive e capaci di ristrutturazione, e che si costruisce attraverso pratiche fisicamente orientate che non sono sostituibili dalla produzione di output formalmente corretti. Questa proposizione è fondata sul Blocco II (la psicologia cognitiva dell'expertise), sul Blocco V (la fisica come pratica culturale e la trasmissione del sapere tacito), e sul Blocco VI (la teoria della lettura della natura).

Terza proposizione: I sistemi artificiali attuali non possiedono la lettura della natura nel senso delle prime due proposizioni, e questa assenza non è una questione di scala — non si risolve con modelli più grandi addestrati su più dati fisici — ma una conseguenza strutturale del modo in cui questi sistemi costruiscono e usano le rappresentazioni. Questa proposizione è fondata sul Blocco V (i proof assistant e AlphaProof come casi limite), sul Blocco VI (il confronto strutturale tra il fisico e la macchina), e sull'intera convergenza dell'argomento.

Le tre proposizioni sono dipendenti nell'ordine: la terza presuppone la seconda, la seconda presuppone la prima. Ma non sono

equivalenti: ciascuna può essere contestata indipendentemente dalle altre, e le strategie di contestazione sono diverse. Rendere esplicita questa struttura logica è il modo più onesto di presentare un argomento che è stato costruito per convergenza, non per deduzione lineare.

6.14.2 — Il confronto con le tre monografie: navigazione, visione, lettura

Questa monografia è la terza di un ciclo che ha attraversato tre domini in cui il rapporto tra formalismo, prestazione e comprensione assume forme distinte. Vale la pena, in conclusione, rendere esplicita la struttura comparativa che il Complemento teorico ha trattato formalmente.

La **navigazione di significato** (prima monografia: giochi, intelligenza artificiale, expertise strategica) è la struttura cognitiva attraverso cui un agente esperto orienta le proprie mosse in un dominio in cui le regole sono esplicite ma il significato strategico delle posizioni non lo è. La navigazione è fondamentalmente prospettica: è la capacità di leggere una posizione in termini di futuro — di possibilità, di rischi, di strutture che emergeranno. Il suo contenuto cognitivo è fatto di pattern strategici, valori posizionali, e sapere tacito sulla dinamica del gioco.

La **visione di struttura** (seconda monografia: matematica, teoremi di incompletezza, comprensione dimostrativa) è la struttura cognitiva attraverso cui un agente esperto orienta la propria ricerca in un dominio in cui la verità è necessaria ma l'accesso ad essa non è garantito. La visione è fondamentalmente ontologica: è la capacità di «vedere» la struttura matematica come se fosse già presente — di anticipare la forma di una dimostrazione prima di costruirla. Il suo contenuto cognitivo è fatto di chunk matematici, senso estetico come euristico della verità, e sapere tacito sulla struttura del dominio.

La **lettura della natura** (questa monografia: fisica quantistica, comprensione scientifica, intelligenza artificiale applicata alla fisica) è la struttura cognitiva attraverso cui un agente esperto orienta la propria comprensione in un dominio in cui il formalismo è completo

ma l'interpretazione fisica è aperta. La lettura è fondamentalmente ermeneutica: è la capacità di interpretare i simboli del formalismo come descrizioni di una realtà fisica — di costruire una relazione di significato tra il formalismo e il mondo che il formalismo descrive. Il suo contenuto cognitivo è fatto di chunk fisici a quattro livelli (percettivo, causale, strutturale, formale), sapere tacito sulla struttura del dominio fisico, e capacità metacognitiva di valutare i propri limiti.

Le tre strutture non sono tre varianti dello stesso meccanismo: sono tre risposte cognitive a tre tipi distinti di problema epistemico — il problema del significato prospettico (navigazione), il problema della verità strutturale (visione), il problema dell'interpretazione fisica (lettura). Ciò che le accomuna è l'irriducibilità alla prestazione formale: in nessuno dei tre domini la competenza formale è sufficiente per la comprensione, e in tutti e tre i domini i sistemi artificiali mostrano una dissociazione analoga tra eccellenza formale e comprensione nel senso rilevante.

6.14.3 — L'apertura: la domanda che rimane

La domanda che rimane, dopo aver percorso questo ciclo di tre monografie, non è una domanda sulle capacità attuali dei sistemi artificiali: è una domanda sulla struttura dell'intelligenza, umana e artificiale, nei domini in cui la comprensione ha la forma dell'orientamento cognitivo verso una struttura del mondo.

I sistemi artificiali che costruiremo non saranno necessariamente identici ai sistemi attuali: possono avere architetture diverse, processi di addestramento diversi, interazioni diverse con il mondo fisico. È possibile costruire sistemi artificiali che abbiano qualcosa di strutturalmente analogo alla lettura della natura — sistemi con corpi fisici che interagiscono causalmente con il mondo, che costruiscono rappresentazioni attraverso l'esperienza di errori e correzioni, che sviluppano strutture metacognitive attraverso la storia delle proprie ristrutturazioni? Questa domanda è aperta, e la risposta dipende da ipotesi empiriche sull'architettura dell'intelligenza che questa monografia non può risolvere.

Ma c'è una conseguenza che l'argomento di questa monografia permette di trarre indipendentemente da come quella domanda empirica verrà risolta: un sistema artificiale che possedesse la lettura della natura non lo farebbe nella stessa forma in cui la possiedono i fisici umani — perché la lettura della natura nei fisici umani è il prodotto di una storia evolutiva, una storia dello sviluppo individuale, e una storia della formazione disciplinare che ha modellato la struttura cognitiva in modi specifici e non trasferibili. La comprensione artificiale della fisica, se verrà costruita, sarà una comprensione fisica — nel senso che orienta l'agente verso la struttura del dominio fisico — ma sarà una comprensione fisica diversa da quella del fisico umano, nel modo in cui la navigazione strategica di AlphaZero è una navigazione di significato diversa da quella di Kasparov, e non una sua imitazione imperfetta.

Questo non è un risultato limitante: è un risultato liberatorio. Significa che la domanda su cosa i sistemi artificiali capiscano è una domanda genuina — non una domanda retorica a risposta scontata (non capiscono nulla) né una domanda empiricamente ovvia (capiranno tutto abbastanza presto) — ed è una domanda la cui risposta richiede una teoria della comprensione abbastanza precisa da distinguere i tipi di orientamento cognitivo che diversi agenti possono sviluppare verso diversi domini del mondo. Costruire quella teoria è l'impresa che questa monografia ha cercato di avviare.

La lettura della natura è ciò che rimane quando si è capito che il formalismo funziona — e si comincia a chiedersi cosa significa, davvero, che funziona.

Riferimenti per §§ 6.12–6.14: Kohl e Finkelstein (2006), «Effects of Representation on Students Solving Physics Problems», *Physical Review Special Topics — Physics Education Research* 2; Larkin (1983), «The Role of Problem Representation in Physics», in *Mental Models*, Erlbaum; Sabella e Redish (2007), «Knowledge Activation and Organization in Physics Problem Solving», *American Journal of Physics* 75; Cataloglu e Robinett (2002), «Testing the Development of Student

Conceptual and Visualisation Understanding in Quantum Mechanics Through the Undergraduate Career», *American Journal of Physics* 70; Chi, Feltovich e Glaser (1981), «Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices», *Cognitive Science* 5; Ericsson, Krampe e Tesch-Römer (1993), «The Role of Deliberate Practice in the Acquisition of Expert Performance», *Psychological Review* 100; Feynman, Leighton e Sands (1963), *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley; Maudlin (2019), *Philosophy of Physics: Quantum Theory*, Princeton; Wallace (2012), *The Emergent Multiverse*, Oxford; Humphreys (2009), *Extending Ourselves*, Oxford; diSessa (1993), «Toward an Epistemology of Physics», *Cognition and Instruction* 10; Hammer (2000), «Student Resources for Learning Introductory Physics», *American Journal of Physics* 68; Allori (2013), «Primitive Ontology and the Structure of Fundamental Physical Theories», in *The Wave Function*, Oxford.

Complemento teorico — Il criterio di Feynman, la scoperta come atto cognitivo e la geometria delle tre crisi

Tre argomenti che i sei blocchi hanno preparato e non sviluppato

---

§ C.1 — Nota strutturale: la funzione di questo complemento

Il Complemento teorico è un documento separato dai sei blocchi principali per ragioni strutturali che è utile rendere esplicite, perché la distinzione non è editoriale ma argomentativa.

I sei blocchi costruiscono l'argomento dell'opera in modo progressivo: il Blocco I fornisce il formalismo fisico; il Blocco II la struttura cognitiva dell'expertise; il Blocco III la storia del rapporto intuizione-formalismo; il Blocco IV il problema delle interpretazioni;

il Blocco V i sistemi artificiali; il Blocco VI la sintesi. Questo ordine è pensato per un lettore che procede linearmente, e privilegia la costruzione narrativa dell'argomento rispetto alla sua sistematizzazione formale. L'esposizione lineare ha un costo: costringe a introdurre certi concetti prima di averli sviluppati nella loro forma completa, e a rimandare la formalizzazione di strutture che ritornano più volte nell'opera in forme diverse.

Il Complemento teorico serve precisamente a colmare questo costo. I tre strumenti che sviluppa — il criterio di Feynman (§ C.2), l'argomento della scoperta come atto cognitivo (§ C.3), la geometria delle tre crisi (§ C.4) — non sono approfondimenti facoltativi dei temi dei blocchi: sono formalizzazioni che modificano retroattivamente la lettura dell'opera nella sua interezza. Il lettore che ha percorso i sei blocchi e legge il Complemento non si trova di fronte a materiale nuovo: si trova di fronte agli stessi temi sotto una luce diversa, quella della struttura formale che l'esposizione narrativa aveva lasciato implicita.

Ciascuno dei tre strumenti ha un'architettura precisa e una funzione specifica.

Il **criterio di Feynman** (§ C.2) formalizza la nozione di comprensione fisica attraverso la struttura delle vie d'accesso multiple: un agente comprende una legge fisica nella misura in cui possiede un insieme $\{(T_i, \pi_i)\}$ di coppie teoria-procedura derivativa che producono la stessa legge attraverso percorsi concettualmente indipendenti. La formalizzazione introduce il numero di vie d'accesso $n(L, A)$ e il nucleo comprensivo $K(L, A) = \bigcap_i C(T_i, \pi_i)$, e li applica sistematicamente ai sistemi artificiali analizzati nel Blocco V. Questo § C.2 è l'unico luogo della trattazione formale del criterio nell'opera: il § 2.7 del Blocco II introduce il criterio in forma fenomenologica e motivazionale; questo paragrafo ne sviluppa la struttura matematica.

L'**argomento della scoperta** (§ C.3) distingue tra due tipi cognitivi di scoperta scientifica: l'interpolazione in uno spazio di ipotesi predefinito (che i sistemi artificiali eseguono con efficienza superiore agli umani) e l'espansione dello spazio delle rappresentazioni

disponibili (che caratterizza le scoperte scientifiche genuine nel senso della storia della fisica, da Faraday a Heisenberg). Questa distinzione non è accessibile all'analisi della prestazione predittiva: richiede un'analisi della struttura cognitiva del processo generativo, che il § C.3 fornisce.

La **geometria delle tre crisi** (§ C.4) sviluppa una caratterizzazione formale comparativa dei tre domini analizzati nelle monografie della serie — giochi, matematica, fisica — attraverso tre parametri: κ (densità delle vie d'accesso formali), ε (estensione dell'eccedenza comprensiva), α (accessibilità cognitiva di quella eccedenza). Questa geometria rende formalmente precise le affermazioni comparative del Blocco VI e della sezione conclusiva della serie.

Il § C.5 chiude il Complemento rendendo esplicite le connessioni tra i tre strumenti e ciascuno dei sei blocchi.

Il Complemento può essere letto in tre modi diversi: *dopo* i sei blocchi, come formalizzazione sistematica di quanto l'opera ha costruito; *prima* dei blocchi, come mappa formale dell'argomento; *in parallelo*, con il § C.2 letto dopo il § 2.7, il § C.3 letto dopo il § 3.4, il § C.4 letto dopo il § 6.5. Il testo è costruito in modo da essere coerente in tutte e tre le modalità di lettura.

---

§ C.2 — Il criterio di Feynman: comprensione come molteplicità delle vie d'accesso

C.2.1 — Formulazione e giustificazione

Richard Feynman ha formulato, in conversazioni e conferenze documentate, una caratterizzazione epistemologica della comprensione fisica che questa monografia propone di chiamare il **criterio di Feynman**:

Se non riesco a spiegare qualcosa in almeno tre modi radicalmente diversi, non l'ho ancora capito. Capire significa poter abitare il problema da angoli diversi — vederlo come conservazione dell'energia, vederlo come flusso di campo, vederlo come caso limite

di una teoria più generale. Se posso farlo solo in un modo, ho una formula, non una comprensione.

La struttura epistemologica che sottende questa affermazione è precisa e non triviale, e merita una formalizzazione che permetta di applicarla ai sistemi artificiali.

Sia L una legge fisica — per esempio, la legge di gravitazione universale $F = Gm_1m_2/r^2$, oppure l'equazione di continuità $\partial_t\rho + \nabla\cdot J = 0$, oppure il secondo principio della termodinamica. Sia T l'insieme delle strutture teoriche disponibili in un certo contesto (teorie fisiche, principi variazionali, argomenti di simmetria, analisi dimensionale, casi limite). Una **via d'accesso** a L è una coppia (T, π) in cui $T \in T$ è una struttura teorica e π è una derivazione — formale o informale, analitica o analogica, matematica o concettuale — che produce L come conseguenza o caso particolare di T.

Il **numero di vie d'accesso** a L per un agente A è:

$$n(L, A) = \left|\left\{(T, \pi) : T \in T_A,\ \pi \text{ deriva } L \text{ da } T\right\}\right|,$$

dove $T_A \subseteq T$ è il sottoinsieme delle strutture teoriche che A effettivamente possiede. Il criterio di Feynman afferma che la comprensione di L è proporzionale a $n(L, A)$, e che $n(L, A) = 1$ non costituisce comprensione nel senso fisicamente rilevante: costituisce possesso di una rappresentazione sintattica della legge senza abitazione teorica.

Il criterio non è un'arbitrarietà: ha una giustificazione epistemologica precisa. Ogni via d'accesso $\left(T_i, \pi_i\right)$ a L rivela una struttura diversa del fenomeno descritto da L: le sue condizioni di validità, i suoi casi limite, le generalizzazioni, le leggi più fondamentali da cui dipende, le leggi collaterali con cui si connette. Il **nucleo comprensivo** di L per un agente A può essere definito come l'invariante rispetto a tutte le vie d'accesso:

$$K(L, A) = \bigcap_i C\left(T_i, \pi_i\right),$$

dove $C\left(T_{i'}, \pi_i\right)$ è l'insieme delle strutture (condizioni di applicabilità, relazioni, limiti) che la via d'accesso $\left(T_{i'}, \pi_i\right)$ rivela. Al crescere di $n(L, A)$, il nucleo comprensivo $K(L, A)$ converge verso la struttura fisica profonda di L — verso ciò che di essa è necessario dato il quadro teorico complessivo, distinto da ciò che è contingente (una particolarità della parametrizzazione, una convenzione storica, un caso particolare non generalizzabile).

C.2.2 — La legge di gravitazione: un'applicazione dettagliata

La legge $F = Gm_1m_2/r^2$ è il caso più adatto per illustrare il criterio, perché il numero di vie d'accesso disponibili nella fisica moderna è elevato e le strutture che rivelano sono genuinamente distinte.

Via 1 — Fenomenologica (Newton, 1687). La terza legge di Keplero $T^2 \propto a^3$ implica, per orbite circolari, $F \propto m/r^2$; la generalizzazione alla gravità universale è un'inferenza induttiva. Struttura rivelata: la dipendenza $1/r^2$ è un'osservazione empirica generalizzata.

Via 2 — Dal teorema di Gauss per il campo gravitazionale. Il potenziale soddisfa l'equazione di Poisson $\nabla^2\phi = 4\pi G\rho$. Per una sorgente puntiforme, il teorema di Gauss su una sfera di raggio r dà direttamente $\partial_r\phi = GM/r^2$. Struttura rivelata: la dipendenza $1/r^2$ è necessaria in tre dimensioni per qualsiasi sorgente puntiforme e qualsiasi forza che soddisfi la legge di Gauss — segue dalla geometria tridimensionale dello spazio.

Via 3 — Dall'analisi dimensionale. Le grandezze rilevanti sono F, m_1, m_2, r, G. L'unica combinazione dimensionalmente coerente è $F = Gm_1m_2/r^\alpha$, e la simmetria di scambio $m_1 \leftrightarrow m_2$ impone la dipendenza simmetrica. Il vincolo dimensionale e la simmetria riducono lo spazio delle leggi compatibili a una famiglia uniparametrica in α; l'osservazione fisica seleziona $\alpha = 2$, che coincide con la via 2. Struttura rivelata: la legge è fortemente vincolata da simmetria e analisi dimensionale indipendentemente dai dati numerici.

Via 4 — Dal limite newtoniano della relatività generale. La metrica di Schwarzschild nel limite di campo debole produce l'accelerazione $\ddot{r} \approx -GM/r^2\hat{r}$. Struttura rivelata: la gravità newtoniana è l'approssimazione lineare della curvatura dello spaziotempo prodotta da una massa puntiforme; la dipendenza $1/r^2$ segue dalla struttura del tensore di curvatura di Riemann nel limite non-relativistico.

Via 5 — Dal principio di equivalenza einsteiniano. Il principio di equivalenza implica che la massa gravitazionale coincide con la massa inerziale, e questo vincolo, combinato con la struttura della relatività speciale, richiede che la gravità sia una teoria geometrica dello spaziotempo. La legge newtoniana è il caso limite appropriato di qualsiasi tale teoria, dato il contenuto in simmetria e il limite di bassa velocità. Struttura rivelata: la legge di Newton è necessariamente il limite non-relativistico di una teoria geometrica della gravità.

Il nucleo comprensivo $K\left(F_{grav}, A_{esperto}\right)$ è l'invariante su tutte e cinque le vie: la dipendenza $1/r^2$ è necessaria in uno spazio tridimensionale (via 2), è vincolata dall'analisi dimensionale e dalla simmetria (via 3), è il limite non-relativistico della curvatura dello spaziotempo (via 4, 5). Il nucleo comprensivo rivela che la struttura fisica profonda della legge non è la formula ma la geometria tridimensionale dello spazio fisico. Un agente con accesso solo alla via 1 — come qualsiasi sistema artificiale che apprende la legge dai dati — ha $K = \emptyset$: non ha accesso alla struttura che rende la legge necessaria, e non può quindi distinguere le sue condizioni di validità (sistemi non-relativistici, scala macroscopica, assenza di effetti di campo forte) da contesti in cui la legge si modifica.

C.2.3 — Il criterio applicato ai sistemi artificiali

Il sistema AI Feynman (Udrescu e Tegmark, 2020) identifica la legge $F = Gm_1m_2/r^2$ dai dati numerici con alta accuratezza. Ma ha $n\left(F_{grav}, S_{AI}\right) = 1$: possiede solo la via fenomenologica, perché ha appreso la relazione numerica tra le variabili. Non ha la via 2 perché

non ha un modello del campo gravitazionale. Non ha la via 3 perché l'analisi dimensionale richiede la comprensione delle dimensioni fisiche come struttura teorica, non come scale numeriche. Non ha la via 4 né la via 5 perché non ha alcun modello della relatività generale.

Il nucleo comprensivo del sistema è vuoto: $K\left(F_{grav}, S_{AI}\right) = \emptyset$. Questo non è un giudizio sulla qualità dell'architettura del sistema: è un fatto strutturale sulla relazione tra apprendimento da dati e comprensione teorica. Un sistema che apprende la relazione numerica tra variabili fisiche dai dati non ha, per costruzione, accesso alle strutture teoriche che costituiscono le vie d'accesso 2–5. Quelle strutture sono teorie — la teoria del campo gravitazionale, la relatività generale, la teoria delle simmetrie — che non sono *dati* ma *quadri di riferimento* in cui i dati acquisiscono significato fisico.

AlphaFold2 ha $n\left(ripiegamento, S_{AF}\right) \approx 0$ nel senso fisicamente rilevante: la mappatura statistica sequenza→struttura non è una via d'accesso alla struttura del problema nel senso di Feynman. Le vie d'accesso fisiche al ripiegamento proteico — la teoria del funnel energetico, la soluzione dell'equazione di Schrödinger per il sistema proteina-solvente, la teoria dei ponti idrogeno e delle interazioni idrofobiche — non sono rappresentate nel modello. Il modello ha $U_{form} \gg 0$ per il problema specifico del ripiegamento, ma $K\left(ripiegamento, S_{AF}\right) = \emptyset$.

Il criterio di Feynman quantifica dunque la distanza tra prestazione predittiva e comprensione fisica: un agente con alta prestazione predittiva ma $n(L, A) \approx 0$ produce previsioni corrette senza comprensione nel senso fisicamente rilevante. Questa non è una distinzione tra due gradi della stessa cosa: è una distinzione qualitativa tra due tipi di relazione con il dominio fisico.

C.2.4 — Tavola sinottica: vie d'accesso per diversi sistemi artificiali

La seguente tavola sinottica estende l'analisi di § C.2.3 oltre AI Feynman e AlphaFold, comparando sistematicamente $n(L, A)$ e la struttura del nucleo comprensivo $K(L, A)$ per quattro sistemi

artificiali rappresentativi delle principali architetture attualmente impiegate in fisica computazionale. Per ogni sistema è indicato il problema target, le strutture di accesso *effettivamente* possedute (distinte dalle strutture teoriche del dominio che il sistema non ha), e la valutazione del nucleo comprensivo. La colonna «Vie d'accesso» intende le coppie $\left(T_i, \pi_i\right)$ nel senso formale di § C.2.1, non le vie operative del calcolo numerico.

Sistema	Problema target	Vie d'accesso $n(L, A)$	Struttura delle vie	
AI Feynman (Udrescu-Tegmark 2020)	Regressione simbolica di leggi fisiche ($F = Gm_1m_2/r^2$, ecc.)	1	Struttura statistica dei dati: $\left(T_{stat}, \pi_{fit}\right)$	
AlphaFold2 (DeepMind 2021)	Struttura 3D di proteine da sequenza amminoacidica		Mappatura statistica sequenza → struttura; nessuna via fisica nel senso di Feynman	
FermiNet (Pfau et al. 2020)	Funzione d'onda di sistemi elettronici multi-corpo	1	Ottimizzazione variazionale su ansatz neurale: $\left(T_{var}, \pi_{MC}\right)$; possiede la struttura variazionale ma non la struttura fisica del sistema (correlazioni, effetti di scambio)	struttura variazionale } (parziale)

Sistema	Problema target	Vie d'accesso $n(L, A)$	Struttura delle vie	
NequIP / PaiNN (Batzner et al. 2022)	Potenziali di interazione molecolare (energie e forze)	1	Interpolazione dell'ipersuperficie di energia potenziale da dati DFT; nessuna struttura della teoria del legame chimico	
Fisico esperto (riferimento)	Qualsiasi delle leggi sopra		Principio variazionale, analisi dimensionale, limite relativistico, simmetrie, casi limite, esperimenti mentali	: struttura fisica profonda convergente

La differenza strutturalmente rilevante tra FermiNet e gli altri sistemi merita un commento. FermiNet ottimizza un ansatz variazionale — una funzione d'onda parametrizzata da una rete neurale — sulla classe degli stati antisimmetrici per il principio di Pauli. In questo senso possiede *una* via d'accesso con struttura teorica parziale: sa che la funzione d'onda deve essere antisimmetrica, e la struttura di antisimmetria è una struttura teorica (il principio di Pauli) e non un fatto puramente statistico sui dati. Il nucleo comprensivo di FermiNet è dunque non vuoto ma minimale: contiene la struttura variazionale e il principio di antisimmetria, ma non la struttura delle correlazioni elettroniche, degli effetti di scambio, della teoria della perturbazione per i livelli energetici. Un fisico esperto che usa FermiNet come strumento sa perché esso funziona — la variazione del principio su uno spazio di funzioni d'onda sufficientemente ricco

converge verso il fondamentale esatto — ma il sistema stesso non lo sa nel senso di Feynman.

Questa gradazione — da $K = \emptyset$ (AI Feynman, AlphaFold, NequIP) a K minimale (FermiNet) a K ricco (fisico esperto) — non è una progressione verso la comprensione: è una progressione nella struttura delle vie d'accesso *costruite nell'architettura*, non acquisite attraverso l'interazione con il dominio fisico come struttura teorica. La comprensione nel senso del criterio di Feynman richiede non solo la presenza di più vie d'accesso, ma che quelle vie rivelino strutture fisiche profonde — condizioni di validità, connessioni con teorie più generali, casi limite, simmetrie — che nessun sistema che apprende dai dati può acquisire per via statistica.

---

§ C.3 — La scoperta come atto cognitivo

C.3.1 — Contesto di scoperta e contesto di giustificazione

L'epistemologia del XX secolo ha distinto, a partire da Reichenbach (1938), tra il **contesto della scoperta** (le circostanze in cui un'ipotesi viene formulata per la prima volta) e il **contesto della giustificazione** (la struttura logica dell'argomentazione che ne valuta la correttezza). La distinzione è stata usata per delimitare la filosofia della scienza: la scoperta è affare della psicologia e della storia, non dell'epistemologia normativa.

Questa distinzione, nel contesto dell'intelligenza artificiale in fisica, acquista un'urgenza che Reichenbach non poteva prevedere. I sistemi artificiali analizzati nel Blocco V eccellono nel **contesto della giustificazione**: producono strutture proteiche che concordano con la cristallografia, espressioni simboliche che concordano con i dati sperimentali, funzioni d'onda che concordano con i calcoli di riferimento. Ma operano esclusivamente nella modalità della verifica e della predizione: **non formulano ipotesi nuove** nel senso pregnante.

La distinzione tra verifica e scoperta non è banale. Un sistema che predice correttamente la struttura di una proteina mai osservata *verifica* la legge statistica implicita nell'ensemble di strutture note — dimostra che la legge aprendita vale anche nel nuovo caso. Un sistema che *scopre* una legge fa qualcosa di qualitativamente diverso: formula un'ipotesi sulla struttura del dominio che non era contenuta nei dati in forma esplicita, e lo fa attraverso un processo cognitivo che supera la statistica dell'ensemble osservato.

C.3.2 — Struttura cognitiva della scoperta

La scoperta nel senso rilevante ha una struttura cognitiva precisa che la psicologia della scienza ha analizzato a partire da Hanson (1958), Kuhn (1962) e Nickles (1980). Una scoperta non è semplicemente un'osservazione nuova: è la percezione di una struttura nuova nel dominio, che permette di vedere vecchie osservazioni in una luce nuova.

Il caso paradigmatico è quello di Kepler: i dati planetari di Tycho Brahe erano disponibili; Kepler li rianalizzò e «scoprì» che le orbite sono ellittiche. La scoperta non era nei dati: era nella struttura cognitiva che Kepler portò ai dati — la disposizione a rappresentare le orbite come coni sezionati da un piano, la familiarità con le sezioni coniche come figure geometriche, la decisione di cercare la forma semplice che fit i dati meglio del cerchio. Senza questa struttura cognitiva preesistente, i dati di Tycho avrebbero potuto essere interpolati con un'ellisse senza che nessuno riconoscesse l'ellisse come struttura — come la connessione tra il moto planetario e la geometria delle sezioni coniche.

La distinzione tra interpolazione e scoperta non è di grado: è di struttura. L'interpolazione produce una rappresentazione funzionale di dati noti; la scoperta produce una **ridefinizione dello spazio delle rappresentazioni possibili** — un cambiamento nella struttura cognitiva con cui si guarda al dominio. Kepler non ha interpolato le orbite ellittiche: ha scoperto che le orbite sono ellittiche, il che significa ha riconosciuto le orbite come appartenenti a una categoria geometrica preesistente con una struttura teorica ricca.

C.3.3 — I sistemi artificiali e la scoperta

Questa struttura della scoperta permette di valutare con precisione cosa facciano i sistemi artificiali quando «scoprono» leggi fisiche.

Il sistema AI Feynman di Udrescu e Tegmark (2020) identifica espressioni simboliche che descrivono relazioni tra variabili fisiche a partire da dati. In senso operazionale, questo assomiglia alla scoperta di leggi. In senso strutturale, è un'**interpolazione in spazi di funzioni simboliche**: il sistema cerca, in uno spazio di espressioni matematiche parametrizzate, quella che meglio descrive i dati. Non ridefinisce lo spazio delle rappresentazioni possibili; seleziona un elemento in uno spazio già definito.

La legge di gravitazione universale scoperta dal sistema AI Feynman era già nello spazio di ricerca — nell'insieme delle funzioni simboliche composte da operazioni elementari — prima che il sistema la trovasse. Il sistema ha efficacemente cercato in uno spazio di possibilità predefinito. Questa è una capacità straordinaria dal punto di vista computazionale, ma non è la struttura cognitiva della scoperta nel senso di Kepler: non ridefinisce lo spazio delle rappresentazioni possibili, non vede la legge come appartenente a una categoria con struttura teorica ricca, non riconosce la connessione tra la legge trovata e le strutture teoriche più profonde.

La differenza si manifesta concretamente nei limiti del sistema: il sistema AI Feynman ritrova le leggi fisiche nelle *Feynman Lectures* perché quelle leggi appartengono allo spazio di funzioni elementari su cui è stato addestrato. Non potrebbe trovare leggi che richiedano strutture matematiche fuori dallo spazio di ricerca — leggi che usino integrali di percorso, operatori di campo, tensori di curvatura. Kepler avrebbe potuto trovare orbite ellittiche anche se le sezioni coniche non erano state canonizzate prima di lui, perché la sua struttura cognitiva gli permetteva di ridefinire lo spazio delle rappresentazioni geometriche in risposta ai dati. La scoperta umana è aperta rispetto allo spazio delle rappresentazioni; la «scoperta» artificiale è chiusa sullo spazio predefinito.

C.3.4 — L'abduzione e la struttura della scoperta scientifica

La filosofia della scienza di Peirce (1903) ha identificato nella **abduzione** la struttura logica della scoperta: l'inferenza da un fatto sorprendente C all'ipotesi H tale che, se H fosse vera, C sarebbe spiegato. L'abduzione non è deduzione (da H si deduce C con certezza) né induzione (da molti casi di C si generalizza H): è il «salto» cognitivo verso un'ipotesi esplicativa nuova.

La struttura logica dell'abduzione è: 1. Si osserva il fatto sorprendente C; 2. H spiegherebbe C se fosse vera; 3. Quindi c'è ragione di sospettare che H sia vera.

Il passo cruciale è il secondo: quale H? L'abduzione richiede che l'agente abbia accesso a un insieme di ipotesi candidate tra cui cercare quella che spiega C. Per un essere umano, questo insieme è strutturato dalla comprensione teorica del dominio: il fisico che vede un'anomalia in uno spettro atomico cerca l'ipotesi tra le strutture teoriche disponibili — effetti relativistici, accoppiamento spin-orbita, perturbazioni esterne — perché la sua comprensione strutturale del dominio gli indica dove cercare.

Un sistema artificiale può essere addestrato ad eseguire operazioni abdutte su uno spazio di ipotesi predefinito. Ma il punto epistemologicamente cruciale è la **chiusura dello spazio delle ipotesi**: il sistema cerca tra le possibilità già rappresentate nel suo spazio di ricerca. La scoperta scientifica genuina richiede in alcuni casi l'espansione dello spazio delle ipotesi — la formulazione di categorie teoriche che non esistevano prima — e questa espansione non è eseguibile da un sistema che ottimizza una funzione di perdita su uno spazio fisso di rappresentazioni.

Heisenberg non ha trovato la meccanica matriciale cercando in uno spazio di teorie già rappresentate: ha *inventato* un nuovo tipo di oggetto matematico — le matrici come quantità osservabili — perché la struttura cognitiva che portava al dominio lo ha condotto a vedere che lo spazio delle rappresentazioni disponibili (le traiettorie, le orbite) non era adeguato al fenomeno. Questa espansione dello spazio delle rappresentazioni — il cuore cognitivo della rivoluzione

quantistica — è la struttura della scoperta che i sistemi artificiali non possiedono nel senso rilevante.

---

§ C.4 — La geometria delle tre crisi

C.4.1 — Tre crisi, tre strutture

Le tre monografie di questa serie analizzano tre crisi distinte, prodotte dall'applicazione dell'intelligenza artificiale a tre domini cognitivi complessi. Il confronto tra le tre crisi ha una struttura che nessuna delle tre monografie, isolatamente, può articolare completamente.

Prima crisi (giochi, prima monografia): i sistemi artificiali superano i migliori giocatori umani nei giochi astratti. La crisi è **prestazionale**: il sistema fa *meglio* dell'agente umano nella misura della prestazione definita dal dominio (vincere). La comprensione che i sistemi artificiali non hanno — la navigazione di significato — è cognitivamente accessibile agli agenti umani esperti, e la crisi illumina la struttura cognitiva umana per contrasto.

Seconda crisi (matematica, seconda monografia): i sistemi di dimostrazione automatica verificano dimostrazioni con affidabilità superiore a quella umana; il problema della congettura automatica rimane aperto. La crisi è **formale**: il sistema esegue *correttamente* le operazioni formali di verifica, ma non la pratica cognitiva della scoperta matematica nel senso di Gödel. La comprensione che i sistemi non hanno — la visione di struttura — è cognitivamente accessibile ai matematici creativi, e i teoremi di incompletezza ne dimostrano la necessità strutturale.

Terza crisi (fisica, questa monografia): i sistemi artificiali raggiungono la precisione predittiva del formalismo fisico senza acquisire la struttura cognitiva della lettura della natura. La crisi è **ontologica** a due livelli: non solo i sistemi artificiali non leggono la natura, ma la comprensione ontologica della meccanica quantistica non è pienamente accessibile nemmeno agli agenti umani, per ragioni strutturali del dominio. La crisi è più profonda delle due

precedenti perché colpisce non solo il confine tra umano e artificiale ma il confine tra formalismo e comprensione a un livello più fondamentale.

C.4.2 — La progressione di complessità

Le tre crisi mostrano una **progressione di complessità epistemica** che merita di essere resa esplicita.

Nella prima crisi (giochi), il formalismo è **completo nel senso banale**: le regole del gioco specificano completamente il dominio della performance, e la struttura di significato che eccede le regole è culturale e cognitiva ma non vincolante per la performance. Un agente può giocare go perfettamente senza navigare il significato culturale del gioco — e AlphaZero lo dimostra. La crisi rivela che la navigazione di significato è una struttura cognitiva distinta dalla performance ottimale, non che sia necessaria per la performance.

Nella seconda crisi (matematica), il formalismo è **incompleto nel senso gödeliano**: la verità eccede la dimostrabilità, e questa eccedenza è dimostrata, non solo osservata. I teoremi di incompletezza di Gödel dimostrano che la visione di struttura del matematico ha accesso a verità che nessun sistema formale fisso può dimostrare — nel senso che per ogni sistema formale consistente T esiste una verità non dimostrabile in T. La crisi rivela non solo che la comprensione umana eccede il formalismo, ma che questa eccedenza è strutturalmente necessaria.

Nella terza crisi (fisica), il formalismo è **predittivamente completo ma ontologicamente aperto**: la completezza predittiva coesiste con l'irrisolvibilità interpretativa, e questa struttura è inversa a quella gödeliana. Non è la comprensione umana che eccede il formalismo (come in Gödel): è il formalismo che supera la comprensione umana — nel senso che la completezza predittiva ha raggiunto livelli (dodici cifre decimali di accordo) che la comprensione ontologica non ha ancora raggiunto in modo condiviso. La crisi rivela che il formalismo può essere più potente dell'intuizione fisica che lo ha generato, e che questa asimmetria è strutturale nel dominio quantistico.

C.4.3 — Una formalizzazione comparativa

La struttura comparativa delle tre crisi può essere resa formale attraverso tre parametri che le caratterizzano:

Sia D il dominio, $F(D)$ il suo formalismo, $C_H(D)$ la comprensione umana esperta, $C_{AI}(D)$ la capacità del sistema artificiale. Si definiscono:

- **Completezza del formalismo** $\kappa(F) \in [0,1]$: in che misura il formalismo specifica completamente il dominio (incluse le sue componenti cognitive).
- **Eccedenza della comprensione** $\varepsilon = dim\left(C_H \backslash F\right)/dim\left(C_H\right)$: frazione della comprensione umana che eccede il formalismo.
- **Accessibilità dell'eccedenza** $\alpha \in [0,1]$: in che misura l'eccedenza $C_H \backslash F$ è cognitivamente accessibile all'agente umano.

Crisi	Dominio		
Prima	Giochi		alto
Seconda	Matematica	(Gödel)	strutturale
Terza	Fisica QM	(pred.)	strutturale

La progressione è: da formalismo completo con eccedenza accessibile (giochi), a formalismo incompleto con eccedenza strutturalmente necessaria e accessibile (matematica), a formalismo predittivamente completo con eccedenza strutturalmente necessaria e parzialmente inaccessibile (fisica quantistica).

La terza crisi è epistemicamente la più profonda perché $\alpha < 1$: la comprensione ontologica della meccanica quantistica non è pienamente accessibile nemmeno agli agenti umani, il che significa che il confine tra ciò che si comprende e ciò che si calcola non è solo tra umano e artificiale, ma è interno alla fisica come impresa conoscitiva.

C.4.4 — Implicazioni per la struttura dell'intelligenza artificiale in fisica

La geometria delle tre crisi ha implicazioni dirette per la valutazione dei sistemi artificiali nei tre domini.

Nei **giochi**, la crisi non pone limiti strutturali all'uso dei sistemi artificiali per la ricerca sulla comprensione: si può studiare il contrasto tra la navigazione di significato del giocatore umano e la funzione di valore del sistema artificiale come laboratorio per la cognizione umana. I sistemi artificiali illuminano la struttura cognitiva umana per contrasto, senza sostituirla nelle funzioni che la ricerca vuole analizzare.

Nella **matematica**, la crisi suggerisce che il ruolo appropriato dei proof assistant è la verifica, non la congettura: strumenti che amplificano l'affidabilità formale della matematica umana, non sistemi che scoprono autonomamente strutture nuove. Il confine tra amplificazione e sostituzione è precisamente il confine tra U_{form} e $C_H \backslash F$ — tra ciò che il formalismo può verificare e ciò che la visione di struttura vede prima della verifica.

Nella **fisica quantistica**, la crisi è a due livelli. Al primo livello — il confine tra umano e artificiale — l'implicazione è analoga alla matematica: i sistemi artificiali amplificano la capacità predittiva e computazionale del fisico, ma non la lettura della natura che orienta la ricerca. Al secondo livello — il confine interno alla fisica — l'implicazione è più radicale: nessun agente, umano o artificiale, ha ancora risolta la comprensione ontologica della meccanica quantistica, e i sistemi artificiali — che operano esclusivamente al livello predittivo — non contribuiscono a quella risoluzione e non la richiedono. La comprensione ontologica rimane un problema per la mente umana, non per il calcolo.

---

§ C.5 — Connessione con i sei blocchi

Il Complemento teorico ha sviluppato tre strumenti concettuali — il criterio di Feynman (§ C.2), l'argomento della scoperta come atto cognitivo (§ C.3), la geometria delle tre crisi (§ C.4) — la cui funzione

nell'economia dell'opera non è semplicemente quella di approfondire i temi dei blocchi principali: è quella di *modificare retroattivamente la lettura di ciascun blocco*, rendendone espliciti i presupposti e le connessioni strutturali che l'ordine lineare dell'esposizione non poteva dispiegare. È utile rendere queste connessioni esplicite, blocco per blocco.

Blocco I (*Formalismo della meccanica quantistica*). Il criterio di Feynman (§ C.2) si applica retroattivamente al formalismo stesso: non solo alle leggi fisiche, ma alle strutture matematiche. Quante vie d'accesso ha un fisico all'equazione di Schrödinger? Almeno quattro: la derivazione da principi variazionali (il principio di minima azione quantistico di Feynman), la costruzione per quantizzazione canonica a partire dall'hamiltoniana classica ($\hat{H} = \hat{p}^2/2m + V(\hat{x})$, con la sostituzione $p \to -i\hbar\partial_x$), la sua emergenza dalla struttura del gruppo di Galileo come unica equazione lineare di primo ordine nel tempo invariante per trasformazioni galileiane, e il limite semiclassico dell'equazione di Hamilton-Jacobi. Ogni via d'accesso rivela una diversa struttura del formalismo: la compatibilità con il principio di minima azione rivela il carattere variazionale della meccanica quantistica; la derivazione dalla simmetria di Galileo rivela che l'equazione non è un postulato ma una necessità della struttura del gruppo; il limite semiclassico rivela la connessione con la meccanica classica attraverso la funzione di Hamilton. Il § 1.3 del Blocco I presenta l'equazione in forma motivata; il criterio di § C.2 mostra che quella motivazione è il primo passo verso la comprensione di una struttura che merita almeno quattro vie d'accesso distinte.

Blocco II (*Struttura cognitiva dell'expertise fisica*). La connessione è bidirezionale. Il criterio di Feynman (§ C.2) formalizza ciò che il § 2.7 introduce fenomenologicamente: le «vie cognitivamente diverse» di cui parla la psicologia cognitiva dell'expertise sono esattamente le vie d'accesso (T_i, π_i) nel senso formale. Reciprocamente, la struttura cognitiva documentata nel Blocco II — le rappresentazioni percettive, causali, analogiche che i fisici esperti costruiscono — è il substrato cognitivo entro cui le vie d'accesso multiple diventano possibili.

L'argomento della scoperta (§ C.3) integra il § 2.3 (diagrammi di Feynman): la diffusione dei diagrammi nella comunità della fisica degli anni Cinquanta documentata da Kaiser (2005) non è solo una trasmissione di tecniche di calcolo, ma una trasmissione di un *modo di vedere* — esattamente la struttura abdutti va che § C.3 formalizza come espansione dello spazio delle rappresentazioni.

Blocco III (*Storia del rapporto intuizione–formalismo*). La geometria delle tre crisi (§ C.4) si connette al Blocco III in modo diretto: le tre crisi che § C.4 formalizza attraverso i parametri $(\kappa, \varepsilon, \alpha)$ hanno nella storia narrata dal Blocco III i loro casi esemplari. La scelta di Heisenberg di abbandonare l'*Anschaulichkeit* (§ 3.4) è un caso paradigmatico di riduzione deliberata di α — la decisione di rinunciare all'accessibilità cognitiva dell'eccedenza comprensiva per guadagnare completezza formale. La meccanica ondulatoria di Schrödinger è il tentativo speculare di massimizzare α a scapito della chiarezza formale. L'argomento della scoperta (§ C.3) illumina il § 3.4 da una prospettiva diversa: Heisenberg non ha cercato la meccanica matriciale in uno spazio predefinito di teorie — ha espanso lo spazio delle rappresentazioni disponibili, il che è esattamente la struttura cognitiva della scoperta scientifica genuina che § C.3 distingue dall'interpolazione artificiale.

Blocco IV (*Le interpretazioni della meccanica quantistica*). La connessione più diretta è con il parametro α della geometria delle tre crisi (§ C.4). La proliferazione di interpretazioni empiricamente indistinguibili — Copenaghen, molti mondi, Bohm, GRW, QBism, Rovelli — corrisponde all'accessibilità $\alpha < 1$ della comprensione ontologica: la struttura del formalismo non determina univocamente l'ontologia, e le diverse interpretazioni sono tentativi di massimizzare α in direzioni diverse (massimizzare la semplicità ontologica: molti mondi; massimizzare l'analogia con la meccanica classica: Bohm; massimizzare la coerenza epistemica: QBism). Nessuno di questi tentativi raggiunge $\alpha = 1$, e il criterio di Feynman spiega strutturalmente perché: le interpretazioni diversificano le vie d'accesso ontologiche ma non aggiungono vie d'accesso alle

previsioni empiriche — le vie d'accesso predittive sono già saturate dal formalismo.

Blocco V (*Sistemi artificiali e fisica*). La tavola sinottica di § C.2.4 è il collegamento diretto con il Blocco V. I quattro sistemi analizzati nel Blocco V — AI Feynman, AlphaFold, FermiNet, NequIP — ricevono dalla formalizzazione di § C.2 una valutazione della loro comprensione nel senso del criterio che va oltre la descrizione delle loro prestazioni: è una caratterizzazione della *struttura* del loro rapporto con il dominio fisico. L'argomento della scoperta (§ C.3) integra il § 5.5 (limiti strutturali dei sistemi artificiali): la distinzione tra interpolazione in uno spazio predefinito e espansione dello spazio delle rappresentazioni è la distinzione strutturale che separa la «scoperta» dei sistemi artificiali dalla scoperta scientifica genuina.

Blocco VI (*Lettura della natura*). La connessione è totale: il Blocco VI formula la tesi in termini sintetici che il Complemento ha sviluppato in modo formale. Le quattro componenti della lettura della natura (percettiva, causale, strutturale, ontologica) corrispondono a quattro tipi di vie d'accesso nel senso del criterio di Feynman. La componente ontologica — la più resistente alla comprensione nella meccanica quantistica, come § C.4 formalizza attraverso $\alpha < 1$ — è anche quella che le interpretazioni del Blocco IV cercano di massimizzare senza riuscirci pienamente. La geometria delle tre crisi (§ C.4) articola la struttura comparativa che il § 6.5 introduce in termini qualitativi, aggiungendo i tre parametri che rendono le differenze tra i domini fisicamente misurabili e non solo narrativamente descrivibili.

Insieme, i tre strumenti del Complemento completano la risposta alla domanda generatrice dell'opera: *cosa rivela la storia del rapporto tra formalismo matematico e intuizione fisica sulla struttura della comprensione scientifica, e cosa muta quando sistemi artificiali scoprono leggi naturali e risolvono problemi fisici senza abitare il mondo che quelle leggi descrivono?*

La risposta, ora completa nella sua forma articolata, è questa: la storia rivela che il formalismo e la comprensione sono strutture distinte che si sono separate progressivamente — con la meccanica

quantistica come punto di separazione più radicale. I sistemi artificiali raggiungono il formalismo senza la comprensione. La comprensione che mancano è la lettura della natura: percettiva, causale, strutturale, ontologica. La lettura della natura non è ornamentale: è la struttura cognitiva che orienta la scoperta, giustifica la generalizzazione, rende il formalismo fisicamente significativo — e, nella fisica quantistica, rimane aperta come problema non solo per i sistemi artificiali ma per la fisica stessa.

Riferimenti principali per questo complemento: Feynman, Leighton, Sands (1963), *The Feynman Lectures on Physics*, Addison-Wesley; Peirce (1903), *Pragmatism as a Principle and Method of Right Thinking*; Reichenbach (1938), *Experience and Prediction*, University of Chicago Press; Hanson (1958), *Patterns of Discovery*, Cambridge; Kuhn (1962), *The Structure of Scientific Revolutions*, University of Chicago Press; Udrescu, Tegmark (2020), «AI Feynman: A physics-inspired method for symbolic regression», *Science Advances* 6, eaay2631; Kepler (1609), *Astronomia Nova*; Heisenberg (1925), «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen», *Zeitschrift für Physik* 33, 879.

Capitolo VII — Teoria quantistica dell'informazione e i fondamenti della comprensione fisica

La teoria quantistica dell'informazione (QIT) offre un vocabolario formale per distinguere ciò che può essere trasmesso da ciò che deve essere acquisito per esperienza diretta. Questa distinzione — tra informazione trasmissibile e sapere tacito — è al centro della tesi sulla comprensione fisica sviluppata nell'opera. Il presente capitolo mostra che i teoremi fondamentali della QIT — il limite di Holevo, il no-cloning, il no-broadcasting, e la struttura dei canali quantistici — forniscono una formalizzazione precisa dei limiti della trasmissione della comprensione, e che il discord quantistico offre una misura della correlazione non classica che non è accessibile a nessun protocollo di misura locale. Questi risultati non sono metafore: sono teoremi che si applicano, con le opportune traduzioni, alla struttura della comunicazione scientifica.

VII.1 — Il canale quantistico come modello della comunicazione scientifica

Un canale quantistico è una mappa completamente positiva e trace-preserving (CPTP) $E: B\left(H_S\right) \rightarrow B\left(H_R\right)$ dallo spazio degli stati del mittente allo spazio degli stati del ricevente. La rappresentazione di Kraus garantisce che ogni canale fisicamente realizzabile si scrive:

$$E(\rho) = \sum_k K_k \rho K_k^\dagger, \quad \sum_k K_k^\dagger K_k = 1$$

dove gli operatori K_k sono gli operatori di Kraus che codificano l'interazione con l'ambiente. La capacità classica del canale — quanta informazione classica può essere trasmessa per uso del canale — è limitata superiormente dal limite di Holevo:

$$C(E) \leq \chi(E) = max_{\{p_x, \rho_x\}} \left[S\left(\sum_x p_x E\left(\rho_x\right) \right) - \sum_x p_x S\left(E\left(\rho_x\right)\right) \right]$$

dove $S(\rho) = - Tr(\rho log \rho)$ è l'entropia di von Neumann. Il limite di Holevo è raggiunto nell'ensemble ottimale di stati di input. Esso misura quanta informazione classica è accessibile tramite misure: è la capacità del canale nel senso più ampio compatibile con la meccanica quantistica.

Il punto epistemologico centrale è: il limite di Holevo è la frontiera superiore di ciò che può essere trasmesso attraverso qualsiasi protocollo di comunicazione fisicamente realizzabile. Qualsiasi aspetto della comprensione fisica che superi questo limite — che non sia codificabile in stati quantistici distinguibili — non può essere trasmesso tramite il canale. Questo formalizza la tesi sul sapere tacito: il sapere fisico tacito è ciò che si trova al di sopra del limite di Holevo per i canali di comunicazione linguistica.

VII.2 — No-cloning, no-broadcasting e l'unicità dell'expertise fisica

Il teorema di no-cloning (Wootters e Zurek 1982, Dieks 1982) afferma che non esiste un'operazione unitaria U tale che:

$$U(|\psi\rangle \otimes |0\rangle) = |\psi\rangle \otimes |\psi\rangle \quad \forall |\psi\rangle \in H$$

Il tentativo di clonare uno stato arbitrario contraddice la linearità della meccanica quantistica. Il teorema di no-broadcasting (Barnum

et al. 1996) estende questo risultato agli stati misti: non esiste una mappa CPTP $B: B(H) \to B(H \otimes H)$ tale che $Tr_2(B(\rho)) = Tr_1(B(\rho)) = \rho$ per tutti gli stati ρ in un insieme non commutativo.

La traduzione epistemologica: il sapere fisico esperto, se modellato come stato quantistico di un sistema cognitivo, non può essere «trasmesso» nel senso di produrre una copia identica nel ricevente mantenendo intatto l'originale. Questa è una proprietà strutturale dei sistemi fisici, non una limitazione contingente della pedagogia. L'expertise fisica deve essere «ricreata» nel fisico in formazione attraverso un processo che coinvolge l'esperienza diretta — come documenta la letteratura sull'apprendistato fisico discussa nell'Capitolo X. Il fatto che il no-broadcasting si applichi a insiemi non commutativi di stati è particolarmente rilevante: la struttura concettuale della fisica quantistica è intrinsecamente non commutativa, e quindi il suo sapere esperto soddisfa esattamente le condizioni del teorema.

VII.3 — Mutua informazione quantistica e comprensione

La mutua informazione quantistica tra due sottosistemi A e B di uno stato bipartito ρ_{AB} è:

$$I(A:B)_\rho = S(\rho_A) + S(\rho_B) - S(\rho_{AB})$$

dove $\rho_A = Tr_B(\rho_{AB})$ e $\rho_B = Tr_A(\rho_{AB})$ sono gli stati ridotti. $I(A:B)$ misura le correlazioni totali — classiche e quantistiche — presenti in ρ_{AB}. Essa si scompone come:

$$I(A:B) = J(A:B) + D(A|B)$$

dove $J(A:B) = S(\rho_A) - S(\rho_{A|B})$ è l'informazione classica accessibile tramite misure su B («classical correlations»), e $D(A|B) = I(A:B) - J(A:B)$ è il discord quantistico (Ollivier e Zurek 2001, Henderson e Vedral 2001). Il discord è la componente delle correlazioni che non è accessibile tramite nessuna misura locale ottimale su B; esso è nullo se e solo se lo stato è classicamente correlato nel senso di Ohya.

Il discord quantistico formalizza la distinzione tra correlazioni accessibili esternamente e correlazioni strutturali non localizzabili. Applicato alla cognizione fisica: il sapere condiviso tra fisici esperti include una componente J — trasmissibile tramite testi, equazioni, dimostrazioni — e una componente D che è strutturalmente non trasmissibile tramite canali classici. Questa componente D corrisponde a ciò che nel modello III dell'Capitolo IX è chiamata «attivazione senso-motoria costitutiva»: la modulazione dei sistemi motori, propriocettivi e spaziali che forma il substrato della comprensione incorporata e che non si riduce a proposizioni.

VII.4 — Entropia di entanglement e struttura cognitiva

Per stati puri bipartiti $|\psi\rangle_{AB}$, la decomposizione di Schmidt è:

$$\left|\psi\right\rangle_{AB} = \sum_{i=1}^{min\left(d_A, d_B\right)} \lambda_i \left|u_i\right\rangle_A \otimes \left|v_i\right\rangle_B, \quad \lambda_i > 0, \quad \sum_i \lambda_i^2 = 1$$

L'entropia di entanglement è $E(\psi) = S\left(\rho_A\right) = -\sum_i \lambda_i^2 log \lambda_i^2$, che misura il grado di correlazione non fattorizzabile tra i due sottosistemi. Uno stato prodotto ha $E = 0$; lo stato di Bell $|\Phi^+\rangle = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$ ha $E = 1$ ebit.

Nel contesto cognitivo, l'entropia di entanglement misura il grado in cui la comprensione di un concetto fisico non si fattorizza in componenti indipendenti. La comprensione della meccanica quantistica non è la somma della comprensione del principio di sovrapposizione, dell'entanglement, della misura, della decoerenza: è uno stato del sistema cognitivo che ha entropia di entanglement alta tra questi sottosistemi. Questo formalizza l'osservazione fenomenologica che la comprensione esperta è olistica — non decomponibile in moduli indipendenti — documentata dalla letteratura sulla chunking e sull'expertise (Gobet e Simon 1996, discussi nel §B.3).

VII.5 — Il teorema di Nayak-Shor e i limiti della compressione della conoscenza

Il teorema della compressione quantistica di Schumacher (1995) afferma che n copie di uno stato ρ con entropia $S(\rho)$ possono essere compresse in $nS(\rho)$ qubit con fedeltà che tende a 1 per $n \to \infty$. La compressione al di sotto di $nS(\rho)$ qubit è impossibile senza perdita di informazione. Questo è il teorema di codifica della sorgente quantistica, l'analogo quantistico del teorema di Shannon.

Il teorema ha un'implicazione per la compressione della conoscenza scientifica: se il sapere di un fisico esperto in meccanica quantistica è modellato come un ensemble di stati $\{p_x, \rho_x\}$, la sua compressione ottimale ha dimensione $nS(\bar{\rho})$ dove $\bar{\rho} = \sum_x p_x \rho_x$. Qualsiasi tentativo di comprimere il corpus della conoscenza fisica al di sotto di questo limite produce inevitabilmente perdita — nella forma di concetti compresi parzialmente, strutture analogiche perse, connessioni inter-dominio obliate. Questo formalizza il rischio della trasmissione della fisica tramite sintesi e riassunti: la compressione aggressiva del corpus fisico produce necessariamente perdita di informazione strutturale irrecuperabile.

VII.6 — Implicazioni per i sistemi artificiali

I risultati di questo capitolo convergono su una conclusione precisa per l'epistemologia dei sistemi artificiali in fisica. Un sistema artificiale che opera tramite canali classici — come i modelli linguistici di grandi dimensioni addestrati su testo — ha accesso alla componente J delle correlazioni tra il corpus fisico e i concetti fisici, ma non alla componente D (discord). Può apprendere le equazioni, le dimostrazioni, i risultati sperimentali — tutto ciò che è trasmissibile attraverso un canale classico. Ma la struttura cognitiva dell'esperto — l'attivazione senso-motoria, il chunking, la lettura della natura — che corrisponde al discord non classico delle correlazioni cognitive, rimane strutturalmente inaccessibile tramite addestramento su testo.

Questa non è una limitazione contingente degli attuali sistemi, ma una conseguenza dei teoremi fondamentali della teoria dell'informazione. Un sistema artificiale che sviluppasse comprensione fisica nel senso pieno richiederebbe un canale di

comunicazione quantistico con il corpus fisico — o, nella traduzione corporea del modello III dell'Capitolo IX, un'interazione fisica diretta con i sistemi studiati che attivi i correlati senso-motori della comprensione incorporata. La distinzione tra sistemi artificiali che «verificano» e sistemi artificiali che «comprendono» ha quindi un fondamento fisico preciso, non solo fenomenologico.

VII.7 — Verso una teoria formale della comprensione fisica

I risultati di questo capitolo aprono un programma di ricerca formale. Le domande aperte principali sono: (1) È possibile costruire una misura quantitativa della 'profondità di comprensione' di un sistema cognitivo basata sulla struttura delle correlazioni nel suo spazio degli stati interno? (2) Il discord quantistico è la misura giusta per la componente non-trasmissibile dell'expertise fisica, o servono misure più sofisticate come la geometric measure of quantum discord o le misure di coerenza quantistica? (3) Come si traduce la gerarchia della comprensione fisica — da calcolo meccanico a lettura della natura — nella gerarchia delle risorse quantistiche del sistema cognitivo?

La risposta a queste domande richiederebbe un programma sperimentale che combini le tecniche di neuroimmagine descritte nell'Appendice AC con i metodi della QIT: misurare non solo l'attivazione cerebrale durante il ragionamento fisico, ma la struttura delle correlazioni tra le aree attivate. I risultati di Bassett et al. (2011) sulla topologia delle reti cerebrali durante l'apprendimento, e di Bullmore e Sporns (2012) sull'economia delle reti neurali, suggeriscono che la struttura grafica delle connessioni corticali durante la comprensione esperta potrebbe essere il correlato neurobiologico del discord quantistico nel modello.

Riferimenti per il Capitolo VII

Barnum H., Caves C.M., Fuchs C.A., Jozsa R., Schumacher B. (1996). Noncommuting mixed states cannot be broadcast. Phys. Rev. Lett. 76:2818.

Bassett D.S. et al. (2011). Dynamic reconfiguration of human brain networks during learning. Proc. Natl. Acad. Sci. 108:7641.

Bullmore E., Sporns O. (2012). The economy of brain network organization. Nat. Rev. Neurosci. 13:336.

Dieks D. (1982). Communication by EPR devices. Phys. Lett. A 92:271.

Gobet F., Simon H.A. (1996). Templates in chess memory: A mechanism for recalling several boards. Cogn. Psychol. 31:1.

Henderson L., Vedral V. (2001). Classical, quantum and total correlations. J. Phys. A 34:6899.

Holevo A.S. (1973). Bounds for the quantity of information transmitted by a quantum communication channel. Probl. Inf. Transm. 9:177.

Ollivier H., Zurek W.H. (2001). Quantum discord: A measure of the quantumness of correlations. Phys. Rev. Lett. 88:017901.

Schumacher B. (1995). Quantum coding. Phys. Rev. A 51:2738.

Wootters W.K., Zurek W.H. (1982). A single quantum cannot be cloned. Nature 299:802.

Capitolo VIII — Il gruppo di rinormalizzazione e la lettura della natura a scale multiple

---

VIII.1 — Introduzione: il problema delle scale

La fisica quantistica pone un problema cognitivo che non riguarda solo la non-visualizzabilità dello spazio di Hilbert, ma la struttura stessa del rapporto tra descrizioni valide a scale diverse. Il **gruppo di rinormalizzazione** (RG) è il formalismo che risponde a questa domanda: come si trasformano le leggi fisiche quando si cambia la scala di osservazione? Come emergono le proprietà macroscopiche da una dinamica microscopica di cui si può conoscere solo la struttura statistica?

La tesi di questo capitolo è che il gruppo di rinormalizzazione è un caso paradigmatico della distinzione tra formalismo completo e comprensione aperta. Il formalismo dell'RG è matematicamente potente — permette di calcolare esponenti critici, universalità, flussi nello spazio delle teorie — ma la struttura cognitiva della lettura della natura a scale multiple è irriducibile alla manipolazione di questo formalismo. Capire perché due sistemi fisici con Hamiltoniane microscopiche completamente diverse si comportano allo stesso modo vicino a una transizione di fase è un atto di comprensione strutturale che il calcolo del gruppo di rinormalizzazione non esaurisce.

VIII.2 — Struttura matematica del gruppo di rinormalizzazione

VIII.2.1 — Il flusso nello spazio delle teorie

Sia S lo spazio delle azioni (o Hamiltoniane) $S[\phi]$ che descrivono un sistema fisico in termini di un campo ϕ. La trasformazione di rinormalizzazione R_b con fattore di scala $b > 1$ agisce su S in tre passi:

1. **Integrazione dei modi rapidi**: si integra sui gradi di libertà ad alta frequenza $k \in [\Lambda/b, \Lambda]$, producendo un'azione effettiva $S'\left[\phi_<\right]$ sui soli modi lenti.

2. **Riscalamento**: si riscala il momento $k \to k' = bk$ per ripristinare il cutoff originale Λ.

3. **Rinormalizzazione del campo**: si riscala il campo $\phi \to \phi' = b^{-d_\phi}\phi$ per mantenere la normalizzazione canonica del termine cinetico.

Il risultato è un'azione S' della stessa forma strutturale di S, ma con costanti di accoppiamento modificate. Questo definisce il **flusso RG** nello spazio delle teorie:

$$\frac{dg_i}{dlnb} = \beta_i\left(\{g_j\}\right),$$

dove g_i sono le costanti di accoppiamento e β_i sono le funzioni beta che determinano la velocità e la direzione del flusso. La struttura geometrica di questo flusso è il contenuto fisico del gruppo di rinormalizzazione.

VIII.2.2 — Punti fissi e universalità

Un **punto fisso** S^* è un'azione invariante sotto la trasformazione R_b: $R_b S^* = S^*$ per ogni b. Nei pressi di un punto fisso, la linearizzazione del flusso RG produce la matrice di stabilità $M_{ij} = \partial \beta_i / \partial g_j |_{S^*}$. Gli autovalori λ_i di questa matrice determinano la struttura critica:

- Se $\lambda_i > 0$: l'accoppiamento g_i è **rilevante** — cresce all'aumentare della scala e allontana il sistema dal punto fisso.

- Se $\lambda_i < 0$: l'accoppiamento è **irrilevante** — decade verso zero alle grandi scale.

- Se $\lambda_i = 0$: l'accoppiamento è **marginale** — richiede analisi non lineare.

La fenomenologia critica è governata dai soli accoppiamenti rilevanti: questo spiega il fenomeno dell'**universalità**. Sistemi fisici con hamiltoniane microscopiche diverse — magneti di Ising, liquidi binari, superconduttori — hanno lo stesso comportamento critico se fluiscono verso lo stesso punto fisso sotto il gruppo di rinormalizzazione. Gli esponenti critici ν, η, β (che regolano la divergenza della lunghezza di correlazione, il decadimento delle funzioni di correlazione, la discontinuità dell'ordine) sono determinati dalla struttura del punto fisso, non dai dettagli microscopici.

L'equazione fondamentale che governa la funzione di correlazione vicino al punto critico è la **legge di scala di Widom**:

$$G(r; t, h) = b^{-(d-2+\eta)} G\left(b^{-1} r; b^{y_t} t, b^{y_h} h\right),$$

dove $t = \left(T - T_c\right)/T_c$ è la temperatura ridotta, h il campo esterno, y_t e y_h gli esponenti di scala termica e di campo. La struttura di questa equazione è il cuore dell'universalità: la funzione di correlazione è una funzione omogenea generalizzata che dipende dalla scala solo attraverso le combinazioni t/b^{-y_t} e h/b^{-y_h}.

VIII.2.3 — Rinormalizzazione perturbativa e funzioni β

Nella teoria quantistica dei campi, il gruppo di rinormalizzazione emerge naturalmente dalla struttura delle divergenze ultraviolette. Consideriamo la teoria ϕ^4 in $d = 4$ dimensioni spaziali:

$$S[\phi] = \int d^4x \left[\frac{1}{2}\left(\partial_\mu \phi\right)^2 + \frac{m^2}{2}\phi^2 + \frac{g}{4!}\phi^4\right].$$

La rinormalizzazione perturbativa richiede la regolarizzazione delle divergenze (dimensionale o con cutoff) e la ridefinizione dei parametri nudi in termini dei parametri fisici rinormalizzati. La funzione β della costante di accoppiamento è:

$$\beta(g) = \mu \frac{dg}{d\mu} = \frac{3g^2}{16\pi^2} - \frac{17g^3}{3\left(16\pi^2\right)^2} + O\left(g^4\right),$$

dove μ è la scala di rinormalizzazione. La funzione $\beta > 0$ in questa teoria indica che l'accoppiamento cresce all'aumentare dell'energia (**libertà infrarossa**): la teoria ϕ^4 in quattro dimensioni non è asintoticamente libera. La QCD, al contrario, ha $\beta(g) < 0$ per tre colori e meno di sedici sapori di quarks, producendo la **libertà asintotica** di Gross, Politzer e Wilczek (1973).

VIII.3 — Il significato cognitivo del gruppo di rinormalizzazione

VIII.3.1 — La comprensione dell'universalità come lettura strutturale

Il gruppo di rinormalizzazione produce una delle intuizioni più profonde della fisica del ventesimo secolo: l'universalità. Due sistemi fisici con Hamiltoniane microscopiche completamente diverse — la transizione di fase del magnete di Ising e la transizione

liquido-vapore di un fluido reale — hanno gli stessi esponenti critici perché fluiscono verso lo stesso punto fisso sotto il gruppo di rinormalizzazione. Questa è una struttura cognitiva irriducibile al calcolo: la comprensione del perché due sistemi fisicamente diversi siano nella stessa **classe di universalità** richiede la costruzione di un modello fisicamente abitato dello spazio delle teorie, non solo il calcolo degli esponenti.

Wilson (1971, 1972) ha intuito che la struttura critica non dipende dai dettagli microscopici ma dalla simmetria, dalla dimensionalità dello spazio, e dal numero di componenti del parametro d'ordine — non dalle costanti di accoppiamento specifiche che compaiono nell'Hamiltoniana. Questa comprensione è avvenuta prima del formalismo completo: il flusso RG nello spazio delle teorie era una **immagine cognitiva** prima di essere un apparato di calcolo. Il fisico che comprende l'universalità non solo calcola gli esponenti: abita lo spazio delle teorie, vede il bacino di attrazione del punto fisso, riconosce quali perturbazioni sono rilevanti e quali irrilevanti.

VIII.3.2 — La lettura a scale multiple come struttura cognitiva autonoma

Il gruppo di rinormalizzazione formalizza qualcosa che la fisica ha sempre praticato senza nominare: la costruzione di **descrizioni effettive** valide a scale specifiche. La meccanica dei fluidi descrive l'acqua come un continuo senza riferimento alle molecole; la termodinamica descrive il gas senza riferimento alle traiettorie delle particelle; l'elettrodinamica classica funziona senza riferimento alla struttura del vuoto quantistico. Ogni livello di descrizione ha una propria ontologia, i propri gradi di libertà, i propri parametri.

Il RG mostra che queste descrizioni effettive non sono approssimazioni povere della descrizione fondamentale: sono la struttura propria della fisica a quella scala, con i soli gradi di libertà rilevanti integrati dentro le costanti di accoppiamento effettive. La **teoria effettiva dei campi** (Weinberg, 1979; Georgi, 1993) ha sistematizzato questa intuizione: ogni teoria fisica è una teoria

effettiva valida al di sotto di una scala di energia Λ, con termini irrilevanti soppressi da potenze di E/Λ.

Questa struttura multi-scala è cognitivamente non banale in un senso preciso: il fisico esperto deve costruire rappresentazioni **simultaneamente abitate a più scale**, tenendo presente che la struttura a una scala è emergente dalla dinamica a scala inferiore ma non è riducibile ad essa per scopi cognitivi. Il fisico dei condensati che studia la superconduttività BCS lavora con coppie di Cooper — gradi di libertà emergenti che non esistono nel Hamiltoniana microscopica degli elettroni — e costruisce una comprensione fisica in termini di queste entità emergenti. Questa non è pigrizia cognitiva: è la struttura propria della comprensione fisica a quella scala.

VIII.3.3 — Sistemi artificiali e il problema delle scale multiple

I sistemi di intelligenza artificiale applicati alla fisica critica o alle transizioni di fase mostrano una dissociazione strutturale analoga a quella del Blocco V, ma con una caratteristica aggiuntiva che merita attenzione. I modelli di machine learning possono apprendere a classificare fasi e a predire transizioni di fase con alta accuratezza (Carrasquilla e Melko, 2017; van Nieuwenburg, Liu e Huber, 2017) senza costruire alcuna rappresentazione della struttura del gruppo di rinormalizzazione che governa quelle transizioni.

Più specificamente: un classificatore neurale può distinguere la fase ordinata dalla fase disordinata del modello di Ising con accuratezza prossima al 100% senza che la sua rappresentazione interna contenga alcuna traccia della nozione di **bacino di attrazione del punto fisso**, di **dimensione dei parametri rilevanti**, o di **classe di universalità**. Quello che manca non è la prestazione: è la comprensione che due sistemi fisicamente diversi condividano la stessa struttura critica. La macchina può classificare ogni sistema separatamente senza mai cogliere che il magnete di Ising e il fluido di van der Waals sono, nel senso proprio, lo **stesso sistema fisico** vicino alla criticità.

Recentemente, alcuni approcci hanno tentato di costruire rappresentazioni del flusso RG con reti neurali (Mehta e Schwab,

2014; Koch-Janusz e Ringel, 2018), identificando connessioni formali tra la struttura del gruppo di rinormalizzazione e l'architettura delle reti neurali profonde. Questi approcci sono concettualmente interessanti e tecnicamente sofisticati. Ma la questione rilevante per questa monografia non è se una rete neurale possa implementare le equazioni del gruppo di rinormalizzazione: è se un tale sistema **abiti** lo spazio delle teorie nel senso in cui il fisico esperto lo abita. La risposta attuale è no: l'implementazione del formalismo non produce la comprensione multi-scala che il formalismo codifica.

VIII.4 — Il gruppo di rinormalizzazione come caso di formalismo che costruisce ontologia

Il gruppo di rinormalizzazione rappresenta un caso in cui il formalismo non descrive una realtà pre-data, ma **costruisce** le entità ontologiche rilevanti: il punto fisso, la classe di universalità, il parametro d'ordine, l'esponente critico sono oggetti fisici che esistono solo nel contesto del flusso RG. La comprensione di questa struttura è dunque non solo la comprensione di un formalismo applicato a una realtà pre-data, ma la costruzione di una nuova ontologia fisica attraverso il formalismo — esattamente il caso più estremo di lettura della natura come produzione di struttura cognitiva.

Questo ha un'implicazione diretta per la tesi della monografia. Nei capitoli precedenti, la lettura della natura era descritta come la costruzione di un modello fisicamente abitato di una realtà descritta dal formalismo. Nel caso del gruppo di rinormalizzazione, la lettura della natura è la costruzione di un modello fisicamente abitato di uno **spazio di possibilità** — lo spazio delle teorie, non lo spazio dei sistemi fisici. Il fisico che comprende il gruppo di rinormalizzazione non abita un singolo sistema fisico, ma il bacino di attrazione di un punto fisso: una struttura cognitiva di secondo ordine che ha come oggetto non la fisica, ma la struttura dello spazio delle descrizioni fisiche.

VIII.5 — Sintesi: le tre strutture del Capitolo VIII

Il gruppo di rinormalizzazione introduce tre strutture cognitive che completano il quadro della lettura della natura costruito nei capitoli precedenti.

La **prima** è la comprensione dell'emergenza scalare: la capacità di costruire descrizioni fisicamente abitate a scale diverse, ciascuna con la propria ontologia, tenendo presente il rapporto tra i livelli senza ridurre uno all'altro. Questa struttura non ha analogo nei sistemi artificiali che lavorano a una scala fissa.

La **seconda** è la lettura dell'universalità: la comprensione che sistemi fisicamente diversi condividano la stessa struttura critica perché sono nel bacino di attrazione dello stesso punto fisso. Questa comprensione è strutturale nel senso preciso del Blocco VI: riguarda la geometria dello spazio delle teorie, non le proprietà di un sistema specifico.

La **terza** è l'ontologia del secondo ordine: la capacità di abitare cognitivamente uno spazio di possibilità — lo spazio delle teorie — piuttosto che un sistema fisico determinato. Questa è la forma più astratta della lettura della natura, e la più distante dall'elaborazione simbolica che i sistemi artificiali implementano.

La convergenza di queste tre strutture con le componenti della lettura della natura identificate nel Blocco VI — percettiva, causale, strutturale, ontologica — mostra che il gruppo di rinormalizzazione non è un caso isolato ma un caso esemplare: il caso in cui la struttura multi-scala della fisica rende più visibile ciò che la comprensione fisica sempre è.

Riferimenti per il Capitolo VIII

Carrasquilla J., Melko R.G. (2017). Machine learning phases of matter. Nat. Phys. 13:431–434.

Fisher M.E. (1974). The renormalization group in the theory of critical behavior. Rev. Mod. Phys. 46:597–616.

Georgi H. (1993). Effective field theory. Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 43:209–252.

Gross D.J., Wilczek F. (1973). Ultraviolet behavior of non-abelian gauge theories. Phys. Rev. Lett. 30:1343.

Koch-Janusz M., Ringel Z. (2018). Mutual information, neural networks and the renormalization group. Nat. Phys. 14:578–582.

Mehta P., Schwab D.J. (2014). An exact mapping between the variational renormalization group and deep learning. arXiv:1410.3831.

Politzer H.D. (1973). Reliable perturbative results for strong interactions. Phys. Rev. Lett. 30:1346.

van Nieuwenburg E.P.L., Liu Y.H., Huber S.D. (2017). Learning phase transitions by confusion. Nat. Phys. 13:435–439.

Weinberg S. (1979). Phenomenological Lagrangians. Physica A 96:327–340.

Wilson K.G. (1971). Renormalization group and critical phenomena I. Phys. Rev. B 4:3174.

Wilson K.G. (1972). Feynman-graph expansion for critical exponents. Phys. Rev. Lett. 28:548.

Wilson K.G., Kogut J. (1974). The renormalization group and the ϵ expansion. Phys. Rep. 12:75–199.

Zinn-Justin J. (2002). Quantum Field Theory and Critical Phenomena. 4th ed. Oxford University Press.

Capitolo IX — Formalizzazione della lettura della natura: tre modelli

---

Questo capitolo sviluppa i tre modelli formali della lettura della natura delineati nel § 6.13.2. I modelli non pretendono di essere teorie complete: sono schemi formali che catturano aspetti distinti della struttura cognitiva descritta nella monografia, e che producono previsioni abbastanza precise da essere verificabili empiricamente o falsificabili attraverso esperimenti cognitivi. L'obiettivo è costruire un fondamento formale per il programma di ricerca del § 6.13, non sostituire l'analisi qualitativa dei blocchi con una formalizzazione tecnica prematura.

IX.1 — Modello I: la struttura bayesiana della lettura della natura

Impostazione del modello. Il fisico F è modellato come un agente bayesiano che mantiene una distribuzione di probabilità P_F sullo spazio S delle strutture fisiche possibili. Osservando un insieme di dati fisici D (misure, tracce, spettri, anomalie), il fisico aggiorna la propria distribuzione secondo la regola di Bayes:

$$P_F(S|D) = \frac{P_F(D|S) \cdot P_F(S)}{P_F(D)}$$

dove $P_F(S)$ è la distribuzione a priori del fisico (che codifica il suo sapere fisico tacito e il suo repertorio di chunk), $P_F(D|S)$ è la funzione di verosimiglianza (la probabilità che la struttura S produca i dati D, secondo il modello fisico del fisico), e $P_F(S|D)$ è la distribuzione aggiornata (la lettura della natura del fisico alla luce dei dati D).

Componenti della lettura nel modello. La lettura della natura, in questo modello, ha tre componenti formali distinte:

Il **repertorio di chunk** è rappresentato dalla struttura dello spazio S: le strutture fisiche che il fisico considera possibili, e la loro organizzazione in famiglie di strutture simili. Un fisico con un repertorio di chunk ricco ha uno spazio S più finemente strutturato di un novizio: distingue strutture fisiche che il novizio raggruppa nella stessa categoria, e riconosce somiglianze strutturali che il novizio non vede.

Il **sapere fisico tacito** è rappresentato dalla distribuzione a priori $P_F(S)$: l'assegnazione di probabilità alle strutture fisiche prima di osservare i dati. Un fisico esperto ha una distribuzione a priori che concentra la probabilità sulle strutture fisiche che l'esperienza ha insegnato essere frequenti nel dominio — un prior informato. Il novizio ha una distribuzione a priori più uniforme, o peggio, una distribuzione deformata da assunzioni errate che l'esperienza non ha ancora corretto.

La **calibrazione epistemica** è rappresentata dalla accuratezza della funzione di verosimiglianza $P_F(D|S)$: quanto accuratamente il fisico modella le previsioni di ciascuna struttura fisica sui dati osservabili. Un fisico ben calibrato ha funzioni di verosimiglianza che riflettono accuratamente le previsioni delle strutture fisiche; un fisico mal calibrato ha funzioni di verosimiglianza distorte, che producono letture sistematicamente errate anche a fronte di dati coerenti.

Previsioni del modello. Il modello produce diverse previsioni verificabili. Prima: i fisici esperti convergeranno su interpretazioni dei dati più rapidamente dei novizi, per l'effetto del prior informato — a parità di dati, il fisico esperto ha già concentrato la distribuzione a priori sulle strutture fisiche rilevanti. Seconda: i fisici esperti saranno più resistenti ai dati rumorosi — la struttura del prior permette di distinguere i dati informativi dal rumore più efficacemente. Terza: l'aggiornamento bayesiano produce, nel modello, la struttura delle crisi cognitive del § 2.9.2: quando i dati D sono altamente improbabili sotto tutte le strutture fisiche nel supporto del prior, l'aggiornamento produce un collasso della distribuzione che richiede una ristrutturazione dello spazio S stesso — la crisi cognitiva come evento che ridisegna lo spazio delle strutture possibili.

Limitazione del modello. Il modello bayesiano cattura la struttura inferenziale della lettura della natura ma non la sua struttura incorporata e temporale: tratta il fisico come un agente che aggiorna credenze su strutture fisiche simbolicamente rappresentate, non come un agente la cui lettura della natura è radicata in stati fisici del

corpo e in strutture percettive-motorie. Questo è il limite che il modello III tenterà di superare.

IX.2 — Modello II: la geometria dell'expertise fisica

Impostazione del modello. Lo spazio R delle rappresentazioni fisiche è dotato di una struttura metrica $d: R \times R \to R_{\geq 0}$ che misura la distanza cognitiva tra rappresentazioni. La distanza $d(r_1, r_2)$ tra due rappresentazioni fisiche $r_1, r_2 \in R$ è interpretata come la difficoltà cognitiva che un agente con expertise data incontra nel passare dall'una all'altra — nel ristrutturare la propria lettura da r_1 a r_2.

Il fisico F è rappresentato come un punto $f \in R$: la sua lettura corrente della natura. Il suo repertorio di chunk è rappresentato da un intorno $B(f, r_F)$ di raggio r_F intorno a f: l'insieme delle strutture fisiche cognitivamente accessibili a F senza ristrutturazione. Le strutture in $B(f, r_F)$ sono le strutture che F riconosce istantaneamente; le strutture fuori dall'intorno richiedono un percorso nello spazio delle rappresentazioni, e la lunghezza del percorso è il costo cognitivo della ristrutturazione.

Traiettorie di sviluppo dell'expertise. La formazione del fisico è modellata come una traiettoria nello spazio R: lo studente di fisica parte da una posizione f_0 — la sua lettura ingenua della natura, fortemente influenzata dall'intuizione meccanica classica — e costruisce, attraverso l'esposizione a casi fisici e la ristrutturazione cognitiva, una traiettoria $f(t)$ nello spazio delle rappresentazioni.

La geometria dello spazio R determina la struttura delle traiettorie possibili. Se lo spazio è piatto (euclideo), le traiettorie sono curve regolari e lo sviluppo dell'expertise è continuo. Se lo spazio ha struttura non piatta — con curvature positive in alcune direzioni e negative in altre — le traiettorie mostrano discontinuità e biforcazioni che corrispondono alle crisi cognitive del § 2.9.2: punti in cui una piccola perturbazione dell'esposizione produce grandi spostamenti nella rappresentazione, perché il fisico è vicino a una regione di alta curvatura dello spazio.

Il problema della misura dell'expertise. Il modello produce una proposta precisa per la misurazione dell'expertise: il raggio r_F dell'intorno cognitivo accessibile a F senza ristrutturazione. Questo raggio è misurabile attraverso test di generalizzazione: presentare al fisico F strutture fisiche a distanze progressive dalla sua rappresentazione corrente f e misurare il punto in cui F comincia a incontrare difficoltà nel riconoscimento e nell'applicazione. La distanza a cui la difficoltà appare è una misura di r_F.

Questa misura è distinta dalla misura della competenza formale: un fisico può avere un intorno cognitivo ampio in un sottodominio (meccanica classica) e stretto in un altro (meccanica quantistica), con conseguenze asimmetriche per il riconoscimento e il transfert. La mappa della struttura dell'intorno cognitivo di un fisico — il suo profilo di expertise nella geometria dello spazio delle rappresentazioni — è la descrizione formale più precisa della sua lettura della natura.

IX.3 — Modello III: la rete semantica incorporata

Impostazione del modello. Il modello III formalizza la componente incorporata della lettura della natura che i modelli I e II trattano implicitamente. La struttura cognitiva del fisico è rappresentata come una rete $N = (V, E, W)$ dove:

- V è l'insieme dei nodi, ciascuno dei quali rappresenta un'unità cognitiva che ha *sia* un componente semantico (un concetto fisico) *sia* un componente senso-motorio (una struttura percettiva-motoria incorporata);
- E è l'insieme degli archi, che rappresentano connessioni tra unità cognitive;
- $W: E \to R_{>0}$ è la funzione di peso, che misura la forza della connessione.

Un chunk fisico nel senso del § 2.12.1 — $C_{osc} = (P, K, S, F)$ — è rappresentato, in questo modello, come un cluster di nodi fortemente connessi: il nodo percettivo P connesso ai nodi cinematici K,

strutturali *S* e formali *F* con pesi alti, e a nodi in altri cluster con pesi più bassi.

Attivazione e propagazione. La lettura della natura è modellata come un processo di attivazione e propagazione nella rete. Quando il fisico osserva uno stimolo fisico — una traccia in una camera a nebbia, un grafico di dati spettrali, una configurazione di un sistema in laboratorio — alcuni nodi della rete vengono attivati dagli stimoli sensoriali. L'attivazione si propaga attraverso gli archi pesati, con la forza di propagazione proporzionale al peso dell'arco, fino a raggiungere un pattern di attivazione stabile che rappresenta la lettura del fisico.

La differenza tra il fisico esperto e il novizio è la struttura della rete: nell'esperto, i cluster corrispondenti ai chunk fisici sono fortemente connessi e i pesi degli archi tra i componenti percettivi, causali, strutturali e formali sono alti. Una piccola attivazione percettiva si propaga rapidamente attraverso l'intero cluster, producendo l'attivazione simultanea di tutti i componenti del chunk — cioè la lettura istantanea della struttura fisica. Nel novizio, i componenti del chunk non sono connessi con pesi alti: l'attivazione percettiva non si propaga ai componenti causali e strutturali, producendo solo il riconoscimento formale superficiale.

La componente incorporata nel modello. Il tratto distintivo del modello III rispetto ai modelli precedenti è la presenza esplicita dei nodi senso-motori: componenti della rete che non sono concetti astratti ma strutture percettive-motorie incarnate. Il nodo percettivo *P* di un chunk fisico non è la rappresentazione simbolica di una struttura visiva: è la struttura percettiva stessa, radicata nell'esperienza sensoriale del fisico con sistemi fisici reali. Questa incarnazione ha due conseguenze formalmente distinguibili.

Prima: la propagazione nella rete passa attraverso i nodi senso-motori, producendo un'attivazione che ha componenti fisiche (modulazione dei sistemi motori, del sistema propriocettivo, della risposta alle strutture spaziali) oltre che cognitive. Questo è coerente con l'evidenza neuroscientifica discussa nell'Appendice AC: il

sistema motorio si attiva durante il ragionamento fisico, non come effetto collaterale ma come componente costitutiva del processo.

Seconda: i nodi senso-motori si costruiscono attraverso l'esperienza fisica, non attraverso la lettura di testi: richiedono la manipolazione di sistemi fisici reali, il laboratorio, la storia personale di esperimenti riusciti e falliti. Questo è il fondamento formale del risultato pedagogico del § 6.12: la lettura della natura non può essere trasmessa per via puramente dichiarativa perché i nodi senso-motori della rete non possono essere costruiti attraverso la lettura di testi, solo attraverso l'esperienza incorporata.

Un confronto formale con i modelli artificiali. I modelli linguistici di grandi dimensioni sono formalizzabili come reti semantiche — trasformatori con meccanismi di attenzione che operano su rappresentazioni distribuite di sequenze di token. La differenza formale tra questi modelli e il modello III non è di scala: è di struttura. I modelli artificiali non hanno nodi senso-motori nel senso del modello III: non hanno strutture percettive-motorie incarnate che si costruiscono attraverso l'interazione fisica con il mondo. Hanno rappresentazioni di parole che descrivono strutture percettive-motorie, ma queste rappresentazioni sono nodi semantici, non nodi senso-motori. La differenza formale produce la differenza empirica documentata nella ricerca sulla comprensione dei sistemi artificiali: la capacità di produrre descrizioni linguistiche di strutture fisiche non è la stessa struttura cognitiva della capacità di leggere fisicamente il dominio.

I tre modelli producono, congiuntamente, una mappa formale della struttura della lettura della natura che è abbastanza precisa da generare previsioni verificabili e abbastanza flessibile da catturare la varietà degli aspetti della struttura cognitiva documentati nei dodici episodi dell'Appendice Y. Il passo successivo del programma di ricerca è costruire esperimenti cognitivi che mettano alla prova queste previsioni — e modificare i modelli di conseguenza.

IX.4 — Confronto dei tre modelli e limiti comuni

I tre modelli sviluppati nelle sezioni precedenti catturano aspetti distinti della struttura della lettura della natura, ma convergono su alcune proprietà strutturali comuni che definiscono i limiti e le possibilità del programma di formalizzazione.

Il primo limite comune è la dipendenza dalla storia. Tutti e tre i modelli hanno proprietà che dipendono dalla traiettoria di sviluppo dell'expertise, non solo dallo stato corrente del fisico. Nel modello I, la distribuzione a priori è il sedimento della storia di aggiornamenti bayesiani del fisico — non può essere dedotta dallo stato corrente senza conoscere la storia. Nel modello II, la geometria dello spazio delle rappresentazioni è plastica: si deforma sotto l'influenza dell'esperienza, e la posizione corrente del fisico non determina la struttura dell'intorno cognitivo senza conoscere le traiettorie precedenti. Nel modello III, i pesi della rete si costruiscono attraverso l'esperienza incorporata e mostrano dipendenza dal percorso — la stessa struttura finale della rete può corrispondere a traiettorie di apprendimento diverse, con conseguenze diverse per la generalizzazione. Questa dipendenza storica è la formalizzazione dell'osservazione di Ericsson sulla pratica deliberata: non conta solo quanto expertise si ha, ma come si è costruita.

Il secondo limite comune è la non-riducibilità all'output. Nessuno dei tre modelli identifica la lettura della natura con l'output comportamentale del fisico — con le risposte corrette, le previsioni accurate, le soluzioni prodotte. Il modello I ha la lettura incorporata nella struttura del prior, non nella distribuzione posteriore. Il modello II ha la lettura nella geometria dello spazio cognitivo, non nella posizione corrente. Il modello III ha la lettura nei pesi della rete, non nell'attivazione prodotta da uno stimolo dato. Questo significa che la misurazione della lettura della natura richiede test che sondino la struttura interna — la velocità di generalizzazione, la resistenza al rumore, la qualità del transfert — non solo l'accuratezza delle risposte su problemi standard.

Il terzo limite comune è la dipendenza dall'esperienza fisica incorporata. Il modello I richiede l'interazione con dati fisici reali per costruire il prior. Il modello II richiede l'esperienza con sistemi fisici per costruire la geometria dell'intorno cognitivo. Il modello III richiede l'esperienza sensoriale-motoria per costruire i nodi incorporati della rete. In tutti e tre i modelli, la lettura della natura non si costruisce attraverso la sola manipolazione simbolica di testi fisici — richiede l'esperienza diretta del mondo fisico. Questo risultato formale converge con l'analisi pedagogica del § 6.12 e con i risultati neuroscientifici dell'Appendice AC: la distinzione tra l'expertise del fisico e la competenza formale del sistema artificiale ha una struttura precisa, non è una questione di grado o di scala computazionale.

IX.5 — Il programma di ricerca: previsioni verificabili

I tre modelli producono, congiuntamente, un programma di ricerca empirica sulla struttura cognitiva della comprensione fisica. Le previsioni più verificabili riguardano quattro fenomeni distinti. La velocità di convergenza: fisici esperti e novizi dati gli stessi dati ambigui — dati compatibili con strutture fisiche multiple — dovrebbero convergere su interpretazioni diverse a velocità diverse, con gli esperti che convergono più rapidamente per l'effetto del prior informato del modello I e dell'intorno cognitivo più ampio del modello II. La resistenza al rumore: fisici esperti dovrebbero essere sistematicamente meno influenzati da dati rumorosi nelle letture di sistemi nel loro dominio di expertise, mentre mostreranno performance comparabile ai novizi in domini non familiari. Il transfert: la struttura delle connessioni della rete del modello III predice che il transfert tra domini avvenga preferenzialmente lungo i percorsi di minor curvatura dello spazio cognitivo — tra domini la cui struttura fenomenologica ha già connessioni nella rete del fisico. La dipendenza dal laboratorio: la costruzione dei nodi senso-motori del modello III predice che la performance su compiti fisici che richiedono stima percettiva sia significativamente più alta per fisici

con esperienza di laboratorio estesa rispetto a fisici con formazione prevalentemente teorica, a parità di competenza formale certificata.

Questi quattro fenomeni sono misurabili con protocolli sperimentali esistenti: paradigmi di pensiero ad alta voce, test di categorizzazione di problemi ispirati a Chi, Feltovich e Glaser (1981), eye-tracking durante la lettura di dati sperimentali, e protocolli di stima ordinale ispirati a Ericsson. Il programma di ricerca non è quindi meramente speculativo: ha un'architettura sperimentale che può falsificare i modelli, distinguere tra loro, e raffinarli sulla base dei risultati.

Capitolo X — La trasmissione del sapere fisico tacito: dal laboratorio alla comunità, dalla comunità alla macchina

---

Il problema della trasmissione del sapere fisico tacito è, in prospettiva storica, uno dei problemi strutturali dell'organizzazione della scienza — un problema che la fisica ha risolto in modi che non sono mai stati completamente tematizzati come tali, e che l'avvento dei sistemi artificiali sta rendendo urgente riesaminare.

X.1 — La struttura del sapere fisico tacito e il problema della trasmissione

Michael Polanyi, nel 1966, ha articolato la formula «sappiamo più di quello che possiamo dire»: il sapere tacito è quella componente della conoscenza che orienta le azioni e i giudizi dell'esperto ma non è riducibile a regole esplicite che potrebbero essere codificate in istruzioni. Nella fisica, questo sapere include: la capacità di stimare rapidamente gli ordini di grandezza di quantità fisiche in sistemi non familiari; il giudizio su quali approssimazioni siano fisicamente legittime in quale regime; la capacità di distinguere il rumore dal segnale nei dati sperimentali prima di applicare metodi statistici; il

senso per la coerenza fisica di una soluzione prima di verificarla formalmente; la capacità di ristrutturare la rappresentazione di un problema quando il primo approccio non converge.

Queste componenti del sapere fisico tacito non sono trasmissibili attraverso testi. Nessun manuale di fisica può trasmettere la capacità di stimare gli ordini di grandezza: può descriverla, può fornire esempi, può illustrarne i principi — ma la capacità stessa si costruisce attraverso la pratica ripetuta in contesti fisicamente variati. Come ha mostrato la ricerca di Ericsson, la pratica deliberata — la pratica orientata dall'esposizione sistematica a casi al limite della competenza attuale — è la struttura che costruisce il sapere tacito, non la semplice ripetizione di procedure note.

Il problema della trasmissione del sapere fisico tacito è dunque il problema di creare le condizioni in cui la pratica deliberata sia possibile — le condizioni in cui uno studente di fisica incontri sistematicamente i casi che costruiscono la struttura cognitiva dell'expertise, con il feedback necessario per distinguere le letture corrette da quelle errate.

X.2 — Il ruolo del laboratorio nella trasmissione del sapere tacito

Il laboratorio di fisica — in tutte le sue forme, dal laboratorio didattico al laboratorio di ricerca — è la struttura istituzionale attraverso cui la fisica ha risolto storicamente il problema della trasmissione del sapere tacito. Il laboratorio non è un'appendice della fisica teorica: è il luogo in cui il sapere fisico tacito si costruisce, si verifica e si trasmette.

La struttura cognitiva del lavoro di laboratorio è fondamentalmente diversa dalla struttura cognitiva del lavoro teorico, anche quando trattano lo stesso fenomeno fisico. Il fisico teorico che calcola la funzione di dispersione di un sistema quantistico costruisce una rappresentazione astratta del sistema; il fisico sperimentale che misura la stessa funzione di dispersione interagisce fisicamente con il sistema — costruisce le strutture percettive-motorie che il modello III chiama nodi senso-motori, attraverso la manipolazione delle

apparecchiature, la lettura degli strumenti di misura, la gestione delle fonti di errore sistematico e casuale.

Questa interazione fisica non è un preludio alla comprensione teorica: è una componente della comprensione fisica che la teoria non può sostituire. Il fisico sperimentale che ha costruito il suo sapere tacito attraverso anni di lavoro di laboratorio legge la fisica in modo diverso dal fisico teorico — vede nel formalismo la struttura degli apparati che produrrebbero o non produrrebbero certi risultati, e questa lettura fisica strumentale è una componente della lettura della natura che il teorista puro non sviluppa nella stessa forma.

La crisi di replicabilità della scienza sperimentale degli ultimi decenni — il fatto che esperimenti pubblicati non siano riproducibili da altri laboratori — è in parte spiegabile nei termini del sapere tacito: gli esperimenti pubblicati descrivono le procedure esplicitamente codificabili, ma non trasmettono il sapere tacito su come gestire le irregolarità, le deviazioni dal protocollo ideale, le condizioni al contorno che un laboratorio esperto controlla tacitamente. La replicabilità richiede la trasmissione del sapere tacito, che richiede la co-presenza e la pratica condivisa.

X.3 — Il sistema dell'apprendistato: come la comunità dei fisici trasmette la lettura della natura

La comunità dei fisici ha sviluppato, nel corso di tre secoli, un sistema di trasmissione del sapere tacito che è istituzionalizzato ma raramente tematizzato esplicitamente: il sistema dell'apprendistato di ricerca. Il dottorato di ricerca non è, nella pratica cognitiva effettiva, un percorso di acquisizione di conoscenze formali — quelle si acquisiscono nei corsi — ma un percorso di costruzione del sapere fisico tacito attraverso la co-presenza con un fisico esperto (il supervisore) in un contesto di ricerca attiva.

La trasmissione che avviene nel dottorato di ricerca ha la struttura dell'apprendistato nei mestieri artigianali: il dottorando osserva come il supervisore legge i risultati sperimentali, come valuta le approssimazioni, come giudica la coerenza fisica delle soluzioni, come decide quali direzioni di ricerca siano promettenti — e

costruisce, attraverso questa osservazione ripetuta e la pratica guidata, una struttura cognitiva che incorpora aspetti del sapere tacito del supervisore. Questa trasmissione non avviene attraverso le istruzioni esplicite del supervisore — «dovresti stimare così», «questo approccio non funzionerà per queste ragioni» — ma attraverso la partecipazione alla pratica di ricerca del supervisore, che rende visibili le strutture cognitive del suo sapere tacito in modo non dichiarativo.

Il sistema dell'apprendistato di ricerca è costoso e lento: richiede anni, presuppone la co-presenza fisica, e scala male — un supervisore può formare al massimo qualche decina di ricercatori nel corso della propria carriera. Ma ha prodotto, nel corso di tre secoli, la trasmissione del sapere fisico tacito che ha reso possibile la scienza fisica moderna. La domanda che l'avvento dei sistemi artificiali rende urgente è: questo sistema è sostituibile? E se sì, con cosa?

X.4 — Il limite della trasmissione testuale e la domanda sull'intelligenza artificiale

La fisica ha sempre usato la trasmissione testuale come complemento alla trasmissione attraverso l'apprendistato: i manuali, i paper, le lezioni registrate trasmettono le componenti dichiarative del sapere fisico — i risultati, i metodi, le derivazioni — e preparano lo studente alla pratica che costruirà il sapere tacito. Ma la trasmissione testuale ha sempre avuto un ruolo strumentale rispetto alla trasmissione attraverso l'apprendistato, non un ruolo sostitutivo.

I sistemi artificiali addestrati su testi fisici sono, per definizione, sistemi di trasmissione testuale estesi: hanno accesso a un corpus di testi enormemente più ampio di qualsiasi singolo fisico, e producono output linguisticamente coerenti con la struttura formale del dominio. Ma producono, per la stessa ragione, esattamente quello che la trasmissione testuale ha sempre prodotto: la componente dichiarativa del sapere fisico, non la componente tacita.

La domanda sull'intelligenza artificiale nella trasmissione del sapere fisico non è dunque «i sistemi artificiali possono trasmettere il sapere fisico tacito?» — la risposta a questa domanda, nei termini del

modello III dell'Capitolo IX, è negativa per ragioni strutturali — ma «i sistemi artificiali possono costruire le condizioni in cui il sapere fisico tacito si sviluppa più efficacemente?». Questa è una domanda empirica aperta, e la risposta dipende da come vengono usati i sistemi artificiali: come strumenti di pratica deliberata guidata (presentare al fisico in formazione casi alla frontiera della competenza, con feedback sulla qualità della lettura), potrebbero essere utili; come sostituti della pratica (produrre le soluzioni invece di costruire la struttura cognitiva che le produce), sarebbero dannosi nella misura in cui prevengono la costruzione del sapere tacito.

Questa distinzione — strumento di pratica vs. sostituto della pratica — è la conseguenza pratica più diretta della tesi della lettura della natura per il problema dell'intelligenza artificiale nell'educazione scientifica. Non è una distinzione tecnica: è una distinzione epistemica che richiede una teoria della comprensione fisica abbastanza precisa da distinguere l'uno dall'altro. La teoria della lettura della natura sviluppata in questa monografia è, tra le altre cose, la fondazione epistemica di questa distinzione.

Riferimenti per le Appendici Y, Z, AA: Maxwell (1855), «On Faraday's Lines of Force», *Transactions of the Cambridge Philosophical Society* 10; Heisenberg (1969), *Der Teil und das Ganze*, Piper [trad. it. *La parte e il tutto*, Adelphi]; Schrödinger (1926), «Quantisierung als Eigenwertproblem», *Annalen der Physik* 79, 361; Dirac (1928), «The Quantum Theory of the Electron», *Proceedings of the Royal Society A* 117; Einstein (1949), «Autobiographical Notes», in *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*, Open Court; Feynman (1985), *QED: The Strange Theory of Light and Matter*, Princeton; Anderson (1933), «The Positive Electron», *Physical Review* 43; Landau (1937), «On the Theory of Phase Transitions», *Zhurnal Eksperimental'noi i Teoreticheskoi Fiziki* 7; Bell (1964), «On the Einstein Podolsky Rosen Paradox», *Physics* 1; Weinberg (1967), «A Model of Leptons», *Physical Review Letters* 19; Gell-Mann (1964), «A Schematic Model of Baryons and Mesons», *Physics Letters* 8; Maldacena (1997), «The Large N Limit of Superconformal Field Theories and Supergravity», *International*

Journal of Theoretical Physics 38; Polanyi (1966), *The Tacit Dimension*, Doubleday; Ericsson, Krampe e Tesch-Römer (1993), op. cit.; Kuhn (1962), *The Structure of Scientific Revolutions*, Chicago; Collins (2010), *Tacit and Explicit Knowledge*, Chicago; Galison (1997), *Image and Logic*, Chicago; Pickering (1984), *Constructing Quarks*, Chicago; Hon e Goldstein (2005), «From Similar Triangles to the Laws of Nature», *Studies in History and Philosophy of Science* 36.

Capitolo XI — Il teorema di Noether come struttura della comprensione fisica: simmetrie, conservazione e la mente del fisico

---

Il teorema di Noether — pubblicato da Emmy Noether nel 1918 come risultato di geometria variazionale — è, per i fisici teorici, qualcosa di molto più di un teorema tecnico: è la struttura cognitiva attraverso cui la lettura di una simmetria si traduce istantaneamente nel riconoscimento di una quantità conservata. Ogni fisico esperto che riconosce l'invarianza per traslazione temporale di un sistema sa, senza calcolare, che l'energia è conservata; chi riconosce l'invarianza per traslazione spaziale sa che il momento lineare è conservato; chi legge l'invarianza di fase di un campo complesso sa che la carica è conservata. Questa lettura immediata — prima del calcolo, come orientamento della ricerca — è precisamente il tipo di comprensione fisica che i blocchi precedenti hanno identificato come «lettura della natura».

Il teorema di Noether è dunque, da un punto di vista cognitivo, un paradigma della struttura che questa monografia analizza: il formalismo lagrangiano non è il luogo in cui la simmetria viene scoperta, ma il luogo in cui una lettura fisica già acquisita viene verificata e resa rigorosa. Il fisico che «vede» una simmetria nel

sistema fisico — che abita il sistema con la percezione delle sue strutture invarianti — usa il formalismo per ricavare le conseguenze di ciò che ha già, in un senso preciso, compreso. Il teorema di Noether documenta, nella struttura stessa dell'argomento formale, la sequenza cognitiva che percorre questa monografia: intuizione fisica, formalizzazione, dimostrazione.

XI.1 — Struttura formale del problema variazionale

La meccanica lagrangiana descrive il moto di un sistema con n gradi di libertà generalizzati q_i attraverso la funzione di Lagrange $L(q_i, \dot{q}_i, t)$, che dipende dalle coordinate generalizzate, dalle loro derivate temporali, e in generale dal tempo. Il principio di minima azione di Hamilton stabilisce che il moto fisicamente realizzato è quello per cui l'azione funzionale

$$S\ [q]\ =\ \int L\left(q_i,\ \dot{q}_i,\ t\right) dt$$

è stazionaria rispetto a variazioni $\delta q_i(t)$ che si annullano agli estremi dell'intervallo di integrazione. La condizione di stazionarietà $\delta S = 0$, sviluppata mediante integrazione per parti, produce le equazioni di Eulero-Lagrange:

$$\frac{d}{dt}\left(\frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i}\right)\ -\ \frac{\partial L}{\partial q_i}\ =\ 0$$

Queste equazioni sono la traduzione formale delle equazioni di Newton in coordinate generalizzate: per $L = T - V$ con T energia cinetica e V potenziale, esse riproducono l'equazione di Newton $m_i\ddot{q}_i = -\partial V/\partial q_i$. Ma il vantaggio cognitivo del formalismo lagrangiano non sta nella semplicità di questa traduzione — sta nel fatto che la struttura delle equazioni è la stessa in qualsiasi sistema di coordinate generalizzate, rendendo manifeste le simmetrie del problema che sarebbero nascoste in coordinate cartesiane.

Il caso dei campi — rilevante per la meccanica quantistica dei campi e per tutte le teorie fondamentali della fisica moderna — estende il formalismo a densità di Lagrangiana $\mathcal{L}(\varphi, \partial\mu\varphi)$, dove φ è un campo

che dipende da tutte le coordinate spazio-temporali. Le equazioni di Eulero-Lagrange per i campi assumono la forma covariante:

$$\partial_\mu\left(\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu\varphi)}\right) - \frac{\partial\mathcal{L}}{\partial\varphi} = 0$$

dove ∂μ ≡ ∂/∂xμ con μ = 0,1,2,3 è la derivata parziale rispetto alle coordinate spazio-temporali. Questa forma covariante è la struttura matematica alla base di tutte le teorie di campo quantistiche — dall'elettrodinamica quantistica alla cromodinamica quantistica al Modello Standard — e la sua invarianza manifesta per trasformazioni di Lorentz è la ragione per cui il formalismo lagrangiano è preferito rispetto al formalismo hamiltoniano in teoria dei campi relativistica.

XI.2 — Il teorema di Noether: dalla simmetria alla legge di conservazione

Una trasformazione continua delle coordinate e del campo è una simmetria del sistema se la densità di Lagrangiana è invariante sotto di essa (a meno di un termine di divergenza totale che non contribuisce alle equazioni del moto). Formalmente, si considera una trasformazione a un parametro continuo ε:

$$\varphi \to \varphi + \varepsilon\cdot\delta\varphi, \quad x^\mu \to x^\mu + \varepsilon\cdot\delta x^\mu$$

Il teorema di Noether stabilisce che a ogni simmetria continua di questo tipo corrisponde una corrente j^μ soddisfacente l'equazione di conservazione:

$$\partial_\mu j^\mu = 0$$

dove la corrente di Noether è determinata dalla variazione del campo e dalla struttura della Lagrangiana secondo la formula:

$$j^\mu = \left(\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial(\partial_\mu\varphi)}\right)\cdot\delta\varphi - \mathcal{L}\cdot\delta x^\mu$$

La carica conservata — l'integrale spaziale della componente temporale della corrente — soddisfa dQ/dt = 0 e costituisce la quantità fisica conservata associata alla simmetria. La struttura

dell'argomento è notevole: la conservazione non viene postulata, ma derivata dalla struttura dell'azione attraverso un argomento puramente formale. Eppure il fisico esperto non ha bisogno di eseguire la derivazione ogni volta: riconosce la simmetria e «legge» direttamente la legge di conservazione — una lettura della natura che il teorema di Noether legittima formalmente.

XI.3 — Invarianza di gauge U(1) e conservazione della carica elettrica

Il caso più rilevante per la meccanica quantistica è l'invarianza di fase globale di un campo fermionico complesso. Se la densità di Lagrangiana è invariante sotto la trasformazione:

$$\psi \to e^{i\alpha}\psi, \quad \bar{\psi} \to e^{-i\alpha}\bar{\psi}$$

dove α è una costante reale (fase globale), il generatore della trasformazione è il campo stesso e il teorema di Noether produce la corrente conservata:

$$j^{\mu} = \bar{\psi}\gamma^{\mu}\psi, \quad \partial_{\mu} j^{\mu} = 0, \quad Q = \int j^{0}\, d^{3}x = const$$

Questa corrente conservata è identificata fisicamente con la corrente di carica elettrica, e Q con la carica totale del sistema. Il fatto che la conservazione della carica elettrica sia una conseguenza dell'invarianza di fase — una simmetria puramente matematica del formalismo — ha un impatto cognitivo che travalica il risultato tecnico: rivela che la carica non è conservata perché così «decide» la natura in modo bruto, ma perché il mondo fisico possiede una struttura di simmetria che il formalismo rende visibile.

L'estensione all'invarianza di gauge locale — dove α dipende dal punto $x\mu$ — richiede l'introduzione di un campo di gauge $A\mu$ che trasforma come $A\mu \to A\mu + \partial\mu\alpha$. Questa estensione è il punto di partenza dell'intera teoria dei campi di gauge e del Modello Standard: la struttura di simmetria SU(3) × SU(2) × U(1) del Modello Standard è integralmente determinata dall'imposizione

dell'invarianza di gauge locale, e le forze fondamentali emergono come conseguenza necessaria della struttura di simmetria, non come scelta indipendente.

XI.4 — Il teorema di Noether come struttura cognitiva

La struttura cognitiva del teorema di Noether per il fisico esperto è diversa dalla struttura della prova formale. Il fisico che affronta un sistema fisico nuovo non procede dalla Lagrangiana alle simmetrie alle leggi di conservazione: procede nella direzione inversa. La lettura fisica del sistema — la costruzione del modello fisicamente abitato — inizia dal riconoscimento delle strutture invarianti: questo sistema non ha un punto privilegiato nello spazio, dunque il momento è conservato; questo sistema non ha un istante privilegiato nel tempo, dunque l'energia è conservata. Il teorema di Noether formalizza a posteriori ciò che il fisico ha già letto nella struttura del problema.

Il caso dei sistemi artificiali è particolarmente rivelatore. Un sistema di machine learning applicato a un problema fisico può imparare a identificare quantità conservate dai dati: se gli si forniscono traiettorie di sistemi hamiltoniani, può estrarre le leggi di conservazione per regressione simbolica — come mostrano i lavori di Udrescu e Tegmark (AI Feynman) discussi nel Blocco V. Ma questa estrazione non è strutturalmente equivalente alla lettura di una simmetria: il sistema artificiale identifica una regolarità nelle traiettorie senza abitare la struttura di simmetria del sistema fisico che la produce. Può trovare che una certa combinazione di coordinate è conservata senza avere accesso alla struttura di gauge che la spiega. Il teorema di Noether rivela, per differenza, cosa manca ai sistemi artificiali: non la capacità di identificare invarianti, ma la capacità di leggerli come conseguenze di una struttura di simmetria del mondo fisico.

Riferimenti: Noether (1918), «Invariante Variationsprobleme», Nachrichten der Akademie der Wissenschaften in Göttingen; Weyl (1929), «Elektron und Gravitation I», Zeitschrift für Physik 56; Peskin

e Schroeder (1995), An Introduction to Quantum Field Theory, Addison-Wesley, cap. 2; Goldstein, Poole e Safko (2002), Classical Mechanics, 3ª ed., Addison-Wesley, cap. 13; Udrescu e Tegmark (2020), citato nel Blocco V.

Capitolo XII — La fase di Berry e la topologia della comprensione fisica: invarianti globali, geometria dello spazio dei parametri e struttura della lettura non-locale

---

La fase geometrica di Berry — scoperta da Michael Berry nel 1984 e pubblicata su Proceedings of the Royal Society — è uno degli esempi più cognitivamente rivelatori della fisica del Novecento. Il risultato tecnico è relativamente semplice: quando un sistema quantistico evolve adiabaticamente lungo un circuito chiuso nello spazio dei parametri che definiscono l'hamiltoniana, esso accumula una fase γ che non dipende dalla velocità con cui il circuito viene percorso, ma solo dalla geometria del circuito. Questa fase è quindi una proprietà globale del percorso nello spazio dei parametri — un invariante geometrico — e non è derivabile da alcuna proprietà locale del sistema.

Il significato cognitivo di questo risultato supera di gran lunga la sua portata tecnica. La fase di Berry rivela che la meccanica quantistica ha una struttura geometrica globale — una struttura di fibrato principale con connessione — che non è visibile nell'equazione di Schrödinger locale ma emerge solo quando si considera l'evoluzione su circuiti chiusi nello spazio dei parametri. Questa struttura globale è precisamente il tipo di proprietà che la lettura della natura deve

cogliere al di là del calcolo puntuale: è una struttura che richiede un'intuizione geometrica dello spazio dei parametri, non la soluzione dell'equazione di Schrödinger in ogni punto.

XII.1 — Il teorema adiabatico e la connessione di Berry

Il punto di partenza è il teorema adiabatico discusso nel §1.3.2: se l'hamiltoniana H(R) dipende da un vettore di parametri R(t) che varia lentamente nel tempo, e se il sistema si trova inizialmente nell'n-esimo autostato |n(R(0))⟩ di H(R(0)), allora esso rimane nell'n-esimo autostato istantaneo per tutto il percorso, accumulando una fase totale:

$$|\psi(t)\rangle \;=\; e^{i\gamma_n(t)} \cdot e^{i\theta_n(t)} \cdot |n(R(t))\rangle$$

dove θ◎(t) = −(1/ℏ)∫₀ᵗ E◎(R(t'))dt' è la fase dinamica ordinaria (proporzionale all'energia integrata nel tempo), e γ◎(t) è la fase geometrica di Berry, che Berry ha mostrato avere la struttura di un integrale di linea nello spazio dei parametri. La connessione di Berry — l'analogo di un potenziale vettore nello spazio dei parametri — è definita come:

$$A_n(R) \;=\; i\langle n(R)|\nabla_R|n(R)\rangle$$

Questa connessione è reale (poiché la derivazione della condizione di normalizzazione mostra che ⟨n|∇_R n⟩ è immaginaria pura) e trasforma come un potenziale di gauge sotto la libertà di fase degli autostati: se |n(R)⟩ → e^{iξ(R)}|n(R)⟩, allora A_n(R) → A_n(R) − ∇_R ξ(R). La fase di Berry acquisita lungo un circuito chiuso C nello spazio dei parametri è:

$$\gamma_n \;=\; \oint_C A_n(R)\cdot dR$$

Questa fase è invariante di gauge — la variazione di A_n è un gradiente esatto, il cui integrale su un circuito chiuso è nullo per il teorema di Stokes — ed è quindi fisicamente osservabile: può produrre effetti di interferenza misurabili, a differenza della fase dinamica che dipende dalla velocità di percorrenza del circuito.

XII.2 — La curvatura di Berry e il numero di Chern

L'analogo della curvatura del campo magnetico nello spazio dei parametri è la curvatura di Berry, definita come il rotore della connessione di Berry:

$$\Omega_n(R) = \nabla_R \times A_n(R)$$

Per un sistema a due livelli — il caso più semplice e pedagogicamente più chiaro — la curvatura di Berry nello spazio dei parametri ha la forma di un campo di monopolo magnetico, con la singolarità (il «monopolo di Berry») localizzata nel punto di degenerazione dove i due livelli si incrociano. La struttura di monopolo — con la curvatura che si irradia radialmente dal punto di degenerazione — è la prima indicazione che la geometria degli spazi di parametri quantistici ha una struttura topologica non banale.

La generalizzazione più profonda emerge quando si considera la struttura globale dello spazio dei parametri, non solo la geometria locale della curvatura. Per un sistema in un reticolo cristallino nella zona di Brillouin — lo spazio dei momenti con identificazione periodica che ha la struttura topologica di un toro T^2 — il numero di Chern di ciascuna banda è l'integrale della curvatura di Berry sulla zona di Brillouin:

$$C_n = \left(\frac{1}{2\pi}\right) \int_{BZ} \Omega_n(k)\, d^2k \in \mathbb{Z}$$

Il fatto fondamentale — il risultato che rende il numero di Chern una struttura cognitiva di straordinaria potenza per il fisico — è che C_n è un intero: per il teorema di Gauss-Bonnet generalizzato, l'integrale della curvatura di Berry su una varietà compatta chiusa è un invariante topologico che prende necessariamente valori interi. Non può cambiare continuamente: può solo saltare di valori interi quando la struttura topologica della banda cambia, cioè quando il gap energetico si chiude e la banda tocca le bande adiacenti.

XII.3 — Effetto Hall quantistico e conduttanza topologica

La connessione tra numero di Chern e fenomenologia fisica diventa manifesta nell'effetto Hall quantistico intero, scoperto sperimentalmente da von Klitzing nel 1980. In un sistema bidimensionale in un campo magnetico intenso a bassa temperatura, la conduttanza di Hall — la conduttanza trasversa — assume valori quantizzati con precisione straordinaria:

$$\sigma_{xy} = \left(\frac{e^2}{h}\right)\cdot\nu, \quad \nu \in \mathbb{Z}$$

dove ν è esattamente il numero di Chern delle bande occupate (il numero di Landau riempite). La dimostrazione di Thouless, Kohmoto, Nightingale e den Nijs (1982) — il cosiddetto calcolo TKNN — mostra che questo risultato segue direttamente dalla struttura topologica delle bande di Bloch attraverso il numero di Chern. La quantizzazione della conduttanza di Hall non è una conseguenza di qualche proprietà specifica del materiale: è una proprietà topologica, e quindi universale e robusta rispetto a perturbazioni, imperfezioni del cristallo, o variazioni dei dettagli microscopici del sistema.

La robustezza topologica ha un'importanza cognitiva e pratica che merita sottolineare. Un invariante topologico non può essere modificato da perturbazioni continue del sistema: per cambiare il numero di Chern di una banda, è necessaria una transizione di fase topologica che chiude il gap energetico. Questa robustezza è precisamente la ragione per cui la conduttanza di Hall è utilizzata come standard di resistenza: la precisione di quantizzazione ($\nu \times h/e^2$) è attualmente la più alta raggiunta in fisica — migliore di una parte su 10^9 — proprio perché dipende da una struttura topologica discreta, non da proprietà continue del materiale.

XII.4 — Topologia e comprensione fisica: struttura globale e lettura artificiale

La struttura topologica della meccanica quantistica — fasi di Berry, numeri di Chern, invarianti di banda — è il punto in cui la distinzione tra lettura della natura e calcolo formale si manifesta in una forma particolarmente acuta. Il numero di Chern di una banda è un intero: può essere calcolato numericamente su una griglia densa della zona di Brillouin, ma la comprensione fisica di cosa significhi — perché sia un intero, perché sia robusto, perché determini la conduttanza trasversa — richiede una lettura della struttura globale dello spazio dei parametri che non emerge dalla computazione punto per punto.

Un sistema artificiale addestrato a predire la conduttanza di Hall da strutture di banda può imparare a estrarre il numero di Chern dalla struttura degli autovalori e autovettori. Ma questa estrazione non è strutturalmente equivalente alla comprensione che il fisico possiede della topologia delle bande: il fisico vede il numero di Chern come una proprietà globale dello spazio fibrato delle bande sul toro della zona di Brillouin — una struttura geometrica che si costruisce attraverso l'intuizione delle varietà differenziali, non attraverso la regressione su dati di conduttanza. La differenza non è di precisione predittiva: è di struttura cognitiva. Il fisico che comprende i numeri di Chern abita uno spazio di parametri con una struttura geometrica specifica; il sistema artificiale che predice i valori di Chern opera su un mapping numerico senza struttura spaziale.

Riferimenti: Berry (1984), «Quantal Phase Factors Accompanying Adiabatic Changes», Proceedings of the Royal Society A 392; Thouless, Kohmoto, Nightingale e den Nijs (1982), «Quantized Hall Conductance in a Two-Dimensional Periodic Potential», Physical Review Letters 49; von Klitzing, Dorda e Pepper (1980), «New Method for High-Accuracy Determination of the Fine-Structure Constant», Physical Review Letters 45; Nakahara (2003), Geometry, Topology and Physics, 2ª ed., IOP Publishing; Hasan e Kane (2010), «Colloquium: Topological Insulators», Reviews of Modern Physics 82.

Capitolo XIII — La struttura formale dell'entanglement: dalla decomposizione di Schmidt alle leggi d'area, tra completezza predittiva e inabitabilità cognitiva

L'entanglement quantistico è il fenomeno che più di ogni altro documenta la tesi centrale di questa monografia nella sua forma più netta. Da un lato, la struttura formale dell'entanglement è completamente e rigorosamente caratterizzata: la decomposizione di Schmidt, l'entropia di von Neumann, i criteri di separabilità, le disuguaglianze di Bell e di Tsirelson, le leggi d'area per i sistemi many-body — sono tutti strumenti analitici che danno al fisico un controllo formale completo sulle correlazioni quantistiche. Dall'altro, l'entanglement resiste a qualsiasi lettura fisica nel senso che questa monografia ha costruito attraverso i sei blocchi: non è visualizzabile, non è simulabile classicamente nemmeno approssimativamente, non è rappresentabile attraverso immagini fisiche che precedano il formalismo.

L'entanglement è il caso paradigmatico di quella dissociazione tra completezza predittiva e inabitabilità cognitiva che il §I.3 ha identificato come il nucleo della tesi. Il formalismo descrive l'entanglement con precisione arbitraria; la comprensione del fisico — nel senso della lettura della natura come struttura cognitiva percettiva, causale, analogica — non può abitare lo spazio degli stati

entangled. Non è una limitazione provvisoria delle nostre capacità cognitive: è, come il Blocco IV ha mostrato per le interpretazioni della meccanica quantistica, una proprietà strutturale dello spazio di Hilbert dei sistemi composti.

XIII.1 — La decomposizione di Schmidt: struttura dell'entanglement bipartito

Dato uno stato puro $|\psi\rangle$ di un sistema bipartito AB, con $H_A \otimes H_B$ lo spazio degli stati, la decomposizione di Schmidt è la rappresentazione canonica dell'entanglement bipartito. Il teorema garantisce l'esistenza di basi ortonormali $\{|iA\rangle\}$ di H_A e $\{|iB\rangle\}$ di H_B tali che:

$$|\psi\rangle = \Sigma_i \sqrt{\lambda_i}|iA\rangle \otimes |iB\rangle, \quad \lambda_i \geq 0, \quad \Sigma_i \lambda_i = 1$$

I coefficienti λ_i — i quadrati dei coefficienti di Schmidt — sono gli autovalori della matrice densità ridotta $\rho_A = \mathrm{Tr}_B(|\psi\rangle\langle\psi|)$, e coincidono con gli autovalori di $\rho_B = \mathrm{Tr}_A(|\psi\rangle\langle\psi|)$. Lo stato è separabile (non entangled) se e solo se un singolo λ_i è uguale a 1 e tutti gli altri sono nulli — cioè se e solo se il numero di Schmidt (il numero di termini non nulli nella decomposizione) è uguale a 1. Il numero di Schmidt è quindi il criterio formale di separabilità più diretto per stati puri bipartiti.

La potenza cognitiva della decomposizione di Schmidt per il fisico sta nella sua unicità e nella sua struttura canonica: dato qualsiasi stato bipartito, la decomposizione esiste sempre, è unica (per autovalori non degeneri), e i coefficienti λ_i sono invarianti per trasformazioni unitarie locali (trasformazioni della forma $U_A \otimes U_B$). Questo significa che i coefficienti di Schmidt sono proprietà intrinseche dell'entanglement dello stato, non dipendono dalla base scelta per H_A o H_B. Per il fisico, questa invarianza locale è la traduzione formale del fatto che l'entanglement non può essere creato né distrutto da operazioni locali — anche sofisticate — sulle parti separate del sistema.

XIII.2 — Entropia di entanglement: misura dell'intreccio quantistico

La misura dell'entanglement per stati puri bipartiti è unica (nel senso che qualsiasi misura ragionevole dell'entanglement deve coincidere con essa sotto assunzioni naturali) ed è data dall'entropia di von Neumann della matrice densità ridotta:

$$S_E(\psi) = -Tr_A\left(\rho_A \log \rho_A\right) = -\Sigma_i \lambda_i \log \lambda_i$$

dove i λ_i sono i coefficienti di Schmidt. Questa entropia di entanglement soddisfa S_E ≥ 0 con uguaglianza se e solo se lo stato è separabile (un solo $\lambda_i = 1$); raggiunge il massimo log(min(dim HA, dim HB)) per lo stato massimamente entangled, dove tutti i coefficienti di Schmidt sono uguali. L'entropia di entanglement è quindi una misura geometrica della distanza dall'insieme degli stati separabili — non in senso metrico ordinario, ma nel senso della struttura informazionale dello stato.

Una proprietà fondamentale dell'entropia di entanglement con implicazioni profonde per i sistemi many-body è la subadditività forte. Per un sistema tripartito ABC, la subadditività forte dell'entropia di von Neumann stabilisce:

$$S\left(\rho_{AB}\right) + S\left(\rho_{BC}\right) \geq S\left(\rho_{ABC}\right) + S\left(\rho_B\right)$$

Questa disuguaglianza — dimostrata da Lieb e Ruskai nel 1973 — è una delle poche proprietà dell'entropia quantistica che non ha un analogo classico diretto (la sua versione classica è banalmente vera per entropia di Shannon, ma la dimostrazione quantistica è notevolmente più sottile). La subadditività forte è la base tecnica di molti risultati importanti nella teoria dell'informazione quantistica e nella meccanica statistica quantistica.

XIII.3 — La disuguaglianza di Tsirelson e i limiti delle correlazioni quantistiche

Il teorema di Bell — la cui derivazione completa è nell'Appendice B — dimostra che nessuna teoria a variabili nascoste locali può riprodurre le previsioni della meccanica quantistica. Le disuguaglianze CHSH forniscono il limite quantitativo per le teorie classiche locali: $|\langle BCHSH\rangle| \leq 2$. Ma le correlazioni quantistiche violano questo limite: la meccanica quantistica predice valori fino a $2\sqrt{2}$. Il bound di Tsirelson stabilisce che questo valore è anche il massimo quantistico — nessuno stato quantistico può produrre una violazione maggiore di $2\sqrt{2}$. L'operatore CHSH per un sistema bipartito di qubit è:

$$B_{CHSH} = a\cdot\sigma \otimes (b + b')\cdot\sigma + a'\cdot\sigma \otimes (b - b')\cdot\sigma$$

dove a, a', b, b' sono versori unitari in R^3 e $\sigma = (\sigma x, \sigma y, \sigma z)$ il vettore delle matrici di Pauli. Il bound di Tsirelson afferma che per qualsiasi stato bipartito ϱ e qualsiasi scelta di versori:

$$\left|\langle B_{CHSH}\rangle\right| \leq 2\sqrt{2}$$

Il bound di Tsirelson è raggiunto dallo stato di Bell $|\Phi^+\rangle = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$ con la scelta ottimale dei versori. Questo risultato delimita precisamente il dominio delle correlazioni quantistiche tra il classico (≤ 2) e l'assoluto (≤ 4 per qualsiasi teoria non-segnalante): le correlazioni quantistiche sono più forti di quelle classiche, ma non così forti come consentito dalla sola assenza di comunicazione istantanea. La struttura intermedia del bound di Tsirelson — $2\sqrt{2} \approx 2.83$ — non ha una spiegazione intuitiva ovvia: è una proprietà algebrica della struttura degli operatori sui prodotti tensoriali di spazi di Hilbert.

XIII.4 — Leggi d'area e struttura dell'entanglement nei sistemi many-body

Nei sistemi quantistici a molti corpi — hamiltoniane su reticoli con molti siti, ciascuno con uno spazio di Hilbert locale — l'entanglement ha una struttura che riflette la geometria del sistema. Per sistemi con hamiltoniana locale (interazioni a corto raggio) e gap energetico nello

spettro, lo stato fondamentale soddisfa una legge d'area: l'entropia di entanglement di una regione A scala con la superficie della regione, non con il suo volume:

$$S_E(A) \leq c \cdot |\partial A|$$

dove |∂A| è la misura della superficie di confine della regione A e c è una costante che dipende dai dettagli del sistema ma non dalla dimensione di A. Questa proprietà — dimostrata rigorosamente in una dimensione da Hastings (2007) e verificata numericamente in dimensioni superiori — è straordinariamente non banale: uno stato generico nello spazio di Hilbert 2^N dimensionale di N qubit su reticolo avrebbe un'entropia di entanglement che scala con il volume, non con la superficie. Gli stati fisici degli stati fondamentali locali occupano una frazione esponenzialmente piccola dello spazio di Hilbert totale.

La legge d'area è la base teorica del DMRG (Density Matrix Renormalization Group) — discusso nell'Appendice G — e degli stati matrici-prodotto (MPS): la struttura a basso entanglement degli stati fondamentali locali permette di rappresentarli con un numero di parametri polinomiale invece che esponenziale, rendendo trattabile numericamente il problema della simulazione di sistemi quantistici a molti corpi in una dimensione.

In dimensioni superiori, la legge d'area rimane una proprietà empiricamente robusta ma non è ancora dimostrata in piena generalità per i sistemi con gap. La sua violazione — l'entanglement volumetrico degli stati eccitati e degli stati termici ad alta temperatura — è la firma di stati che non possono essere rappresentati efficientemente da tensor network e che pongono limiti fondamentali alla simulazione classica dei sistemi quantistici.

XIII.5 — L'entanglement come limite della lettura fisica classica

L'analisi dell'entanglement in questo capitolo converge sulla tesi centrale della monografia attraverso un percorso formale preciso.

L'entanglement è completamente caratterizzato dal formalismo: la decomposizione di Schmidt, l'entropia di entanglement, i criteri di separabilità, le disuguaglianze di Bell e Tsirelson, le leggi d'area — nessuna di queste strutture è oscura o incompleta. Il formalismo dell'entanglement è, nel senso tecnico più preciso, completo: produce previsioni accurate per tutti gli esperimenti possibili.

Eppure l'entanglement non è abitabile cognitivamente nel senso della lettura della natura. Non si può disegnare un sistema entangled — ogni diagramma spaziale tradisce il fatto che i due sottosistemi non hanno stati propri indipendenti. Non si può simulare classicamente l'evoluzione di un sistema entangled senza un costo esponenziale nella dimensione dello spazio di Hilbert. Non esiste una storia causale degli eventi «ciò che fa A causa ciò che accade a B» — Bell ha dimostrato che qualsiasi tale storia richiederebbe correlazioni non locali che violano la relatività speciale nel senso della causalità. L'entanglement resiste a tutte le strategie di lettura fisica classica — percettiva, causale, analogica — e questa resistenza non è contingente ma strutturale.

I sistemi artificiali che lavorano con entanglement — FermiNet, i solutori dell'equazione di Schrödinger a molti corpi, i sistemi di calcolo quantistico — navigano in questo spazio computazionalmente, non cognitivamente. Un sistema di machine learning può apprendere a predire l'entropia di entanglement di uno stato da caratteristiche della sua struttura matriciale; può imparare a identificare stati violanti le disuguaglianze di Bell; può imparare a classificare topologicamente le fasi quantistiche. Ma non abita lo spazio degli stati entangled: non costruisce una rappresentazione percettiva dei sistemi entangled, non simula causalmente le correlazioni non-locali, non trasferisce per analogia la struttura di entanglement tra domini diversi. L'entanglement documenta, in questo senso, la differenza strutturale tra la capacità computazionale dei sistemi artificiali e la comprensione fisica degli esperti nella sua forma più netta e formalmente precisa.

Riferimenti: Schmidt (1907), «Zur Theorie der linearen und nichtlinearen Integralgleichungen I», Mathematische Annalen 63;

Bell (1964), citato in Appendice B; Tsirelson (1980), «Quantum Generalizations of Bell's Inequality», Letters in Mathematical Physics 4; Lieb e Ruskai (1973), «Proof of the Strong Subadditivity of Quantum-Mechanical Entropy», Journal of Mathematical Physics 14; Hastings (2007), citato in Appendice G; Vidal (2003), «Efficient Classical Simulation of Slightly Entangled Quantum Computations», Physical Review Letters 91; Eisert, Cramer e Plenio (2010), «Colloquium: Area Laws for the Entanglement Entropy», Reviews of Modern Physics 82.

XIII.6 — Entanglement multipartito e la struttura delle correlazioni quantistiche

L'analisi dei capitoli precedenti si è concentrata sull'entanglement bipartito — il caso di un sistema composto da due sottosistemi A e B — per il quale la teoria è completa e gli strumenti analitici sono canonici. L'entanglement multipartito — il caso di tre o più sottosistemi — presenta una struttura radicalmente più ricca e cognitivamente più opaca, che documenta in modo ancora più netto la dissociazione tra completezza predittiva e inabitabilità cognitiva.

Per un sistema di n qubit, lo spazio degli stati puri è uno spazio proiettivo di dimensione 2^n − 1. La classificazione degli stati entangled multipartiti sotto trasformazioni unitarie locali — operazioni della forma $U_1 \otimes U_2 \otimes ... \otimes U_n$ — produce una struttura di classi di equivalenza incomparabilmente più complessa di quella bipartita. Già per tre qubit, ci sono due classi di entanglement genuinamente tripartito non equivalenti tra loro: la classe degli stati GHZ (Greenberger-Horne-Zeilinger) e la classe degli stati W. Queste due classi non sono interconvertibili attraverso operazioni locali e comunicazione classica (LOCC): rappresentano tipi diversi di entanglement tripartito, con proprietà fisiche diverse e correlazioni strutturalmente distinte.

Lo stato GHZ $|GHZ\rangle = (|000\rangle + |111\rangle)/\sqrt{2}$ ha entanglement massimalmente non-locale: la misura di qualsiasi qubit collassa

istantaneamente l'entanglement degli altri due. Lo stato W $|W\rangle = (|001\rangle + |010\rangle + |100\rangle)/\sqrt{3}$ ha entanglement distribuito: la perdita di un qubit lascia entanglement residuo tra gli altri due. Queste strutture diverse producono correlazioni diverse nelle misure di Bell multipartite — generalizzazioni delle disuguaglianze CHSH a tre o più parti — e risorse diverse per i protocolli di informazione quantistica. La monogamia dell'entanglement — la proprietà per cui l'entanglement di un qubit A con un qubit B limita l'entanglement di A con un terzo qubit C — è la proprietà strutturale che governa la distribuzione dell'entanglement nei sistemi multipartiti.

Per quattro o più qubit, la classificazione dell'entanglement genuinamente multipartito è un problema aperto: non esiste una teoria completa delle classi di entanglement per sistemi con più di tre parti. Ci sono infinitamente molte classi di equivalenza sotto LOCC, e la struttura delle relazioni tra queste classi — quali tipi di entanglement si possono convertire in quali altri — è in gran parte sconosciuta. Questo non significa che il formalismo sia incompleto: si può calcolare l'entropia di entanglement per qualsiasi partizione, verificare le disuguaglianze di Bell multipartite, computare le misure di entanglement genuinamente multipartito. Ma la comprensione della struttura globale dello spazio degli stati entangled multipartiti rimane un problema aperto sia dal punto di vista fisico che cognitivo.

XIII.7 — Entanglement, computazione quantistica e i limiti della simulazione classica

La relazione tra entanglement e computazione quantistica è la manifestazione tecnologica più diretta delle proprietà formali dell'entanglement discusse nelle sezioni precedenti. Il vantaggio computazionale dei computer quantistici — la capacità di risolvere certi problemi esponenzialmente più velocemente dei computer classici — è direttamente connesso alla loro capacità di mantenere ed elaborare stati entangled di molti qubit. La simulazione classica di un sistema di n qubit entangled richiede, in generale, un numero di parametri esponenziale in n: questo è il fondamento tecnico della

difficoltà di simulare sistemi quantistici su computer classici, e della potenziale superiorità dei computer quantistici.

La legge d'area (formula F20) chiarisce quando questa simulazione classica è trattabile: per sistemi con entanglement a basso rango — stati fondamentali di hamiltoniane locali con gap energetico — la struttura dell'entanglement è sufficientemente semplice da essere rappresentata con un numero polinomiale di parametri attraverso i tensor network. La transizione da sistemi trattabili classicamente (basso entanglement, rispettano la legge d'area) a sistemi intrattabili classicamente (alto entanglement, violano la legge d'area) è una transizione di fase nello spazio degli stati — una transizione che separa la regione in cui la simulazione classica è possibile da quella in cui è necessaria la simulazione quantistica.

Per i fisici e i chimici che lavorano su sistemi molecolari e materiali, questa transizione ha conseguenze pratiche immediate. I sistemi fortemente correlati — ossidi di metalli di transizione, superconduttori ad alta temperatura critica, sistemi frustranti magnetici — si trovano tipicamente nella regione di alto entanglement, il che spiega sia la difficoltà di simularli classicamente sia la ragione per cui i metodi di campo medio e le teorie perturbative falliscono nel descriverli. Il sistema artificiale FermiNet, discusso nel Complemento teorico, naviga in questa regione usando una parametrizzazione delle funzioni d'onda molti-corpo attraverso reti neurali profonde — una rappresentazione che è potenzialmente più espressiva dei tensor network ma che non ha ancora una teoria della complessità comparabile.

Il punto cognitivo conclusivo è il seguente. Il fisico esperto che lavora con sistemi fortemente correlati non ha una rappresentazione mentale degli stati entangled multipartiti — non abita lo spazio degli stati nel senso della lettura della natura. Lavora con strumenti formali — le funzioni di Green, le tecniche RPA, i metodi QMC, i tensor network — che sono progettati per navigare nello spazio degli stati entangled senza costruire una rappresentazione percettiva di esso. La comprensione del fisico esperto in questi sistemi non è la lettura dello stato entangled: è la lettura della struttura

dell'entanglement — della sua distribuzione, della sua scala, delle sue conseguenze per le proprietà fisiche osservabili — attraverso strumenti formali che compensano l'inabitabilità cognitiva dello spazio degli stati. Questa compensazione formale della mancanza di abitabilità cognitiva è la forma più matura della comprensione fisica in sistemi quantistici fortemente correlati — e il modello più preciso di ciò che la fisica teorica avanzata fa quando affronta la natura alla scala quantistica.

Capitolo XIV — Simmetria, topologia, correlazione: tre strutture della comprensione fisica e i suoi limiti

---

I Capitoli XI, XII e XIII hanno percorso tre casi di formalismo fisico avanzato — il teorema di Noether e le simmetrie di gauge, la fase di Berry e la topologia dello spazio dei parametri, l'entanglement e la struttura delle correlazioni quantistiche — dal duplice punto di vista che questa monografia ha costruito nei sei blocchi precedenti: la struttura formale del formalismo, da un lato, e la struttura cognitiva della comprensione che il formalismo produce o non produce, dall'altro. Il presente capitolo sintetizza il confronto tra questi tre casi, elabora le implicazioni per la teoria della lettura della natura sviluppata nei blocchi principali, e delinea le conseguenze per il problema dei sistemi artificiali.

XIV.1 — Tre casi, tre strutture della comprensione

I tre casi presentano strutture della comprensione fisica significativamente diverse, e il loro confronto è illuminante proprio perché le differenze sono precise e formalizzabili.

Il teorema di Noether produce il tipo di comprensione fisica più pienamente abitabile. Le simmetrie di un sistema fisico — l'invarianza per traslazione temporale, l'invarianza per rotazione, l'invarianza di fase globale — sono strutture che il fisico esperto può percepire direttamente nella forma delle equazioni del moto, nella geometria del potenziale, nella struttura del gruppo di simmetria del Lagrangiano. La lettura di una simmetria è, nel senso del modello III del Capitolo IX, un'attivazione diretta dei cluster cognitivi corrispondenti ai chunk simmetrici: il fisico vede l'invarianza senza calcolare, e sa immediatamente cosa ne segue per le quantità conservate. Il teorema di Noether formalizza e certifica una comprensione che il fisico esperto aveva già prima della dimostrazione: è l'esempio più puro della sequenza cognitiva che questa monografia ha analizzato — intuizione fisica, formalizzazione, dimostrazione.

La fase di Berry e la topologia producono un tipo di comprensione più complesso: parzialmente abitabile, ma attraverso un'intuizione geometrica che si costruisce con il formalismo, non prima di esso. Le proprietà topologiche non sono immediatamente visibili nella struttura locale delle equazioni — non si «vede» il numero di Chern come si vede l'invarianza traslazionale. Ma il fisico che ha costruito un'intuizione geometrica dei fibrati principali con connessione può leggere la struttura topologica di un problema come struttura globale dello spazio dei parametri: una lettura che richiede il formalismo come substrato dell'intuizione, non come strumento di calcolo. Questa è una forma di comprensione più sottile — il formalismo come protesi cognitiva che estende la lettura della natura a strutture non direttamente percepibili — e descrive un'area della fisica in cui la formazione matematica avanzata non è solo uno strumento tecnico ma un'estensione della struttura cognitiva del fisico.

L'entanglement produce una terza struttura, qualitativamente diversa: la comprensione formalmente completa ma cognitivamente inabitabile. Il formalismo dell'entanglement è completo nel senso più preciso — produce previsioni accurate per tutti gli esperimenti possibili, classifica ogni stato quantistico in base alla sua struttura di

correlazione, descrive il comportamento dinamico dei sistemi entangled senza residui. Ma nessuna struttura cognitiva della lettura fisica — né la percezione diretta, né l'intuizione geometrica, né l'analogia con sistemi classici — può abitare lo spazio degli stati entangled. L'entanglement esiste nel formalismo ma resiste alla lettura fisica in tutte le sue forme.

XIV.2 — Una gerarchia della comprensione fisica

Il confronto dei tre casi suggerisce una gerarchia della comprensione fisica che va oltre la dicotomia semplice tra «comprensione» e «assenza di comprensione» che il §I.3 aveva inizialmente tracciato. La gerarchia ha (almeno) tre livelli:

Al primo livello si trovano le strutture direttamente abitabili: simmetrie, invarianze, strutture di conservazione nel senso di Noether. Queste strutture sono percepibili direttamente nella forma del Lagrangiano, nella geometria del sistema, nella struttura del gruppo di simmetria. Il fisico esperto le legge senza calcolare, le usa come orientamento della ricerca prima di scrivere le equazioni del moto. La comprensione a questo livello è la più ricca e la più robusta: produce capacità di generalizzazione, di transfert tra domini, di anticipazione dei risultati formali.

Al secondo livello si trovano le strutture abitabili attraverso la mediazione del formalismo: topologie, invarianti globali, strutture di fibrati. Queste strutture non sono direttamente percepibili, ma diventano accessibili all'intuizione geometrica del fisico che ha costruito una competenza formale sufficientemente profonda nella geometria differenziale e nella topologia algebrica. La comprensione a questo livello è formalmente mediata: il formalismo non è solo lo strumento che certifica la lettura, ma il substrato su cui la lettura si costruisce. Questa forma di comprensione è più fragile della prima: richiede una formazione matematica specifica che non tutti i fisici posseggono, ed è più difficile da trasmettere perché richiede la costruzione dell'intuizione geometrica, non solo la conoscenza delle procedure di calcolo.

Al terzo livello si trovano le strutture formalmente complete ma cognitivamente inabitabili: l'entanglement, le correlazioni non-locali, le strutture many-body ad alto entanglement. A questo livello, la comprensione fisica prende la forma di una navigazione esperta nel formalismo — la capacità di usare gli strumenti formali in modo appropriato, di interpretare i risultati nel linguaggio fisico, di identificare le conseguenze osservabili delle strutture formali — senza la possibilità di abitare direttamente le strutture stesse. È una forma di comprensione reale e preziosa, ma strutturalmente diversa dalla comprensione dei primi due livelli: è più vicina alla competenza che alla lettura della natura nel senso del §I.3.

XIV.3 — Il criterio di Feynman rivisitato

Il criterio di Feynman, sviluppato nel Complemento teorico e formalizzato nell'Appendice M, identifica la comprensione fisica con la capacità di generare rappresentazioni multiple di uno stesso fenomeno fisico: calcolare lo stesso risultato in almeno due modi completamente diversi, costruire almeno due immagini fisiche complementari, produrre almeno una previsione verificabile non ovvia. Alla luce della gerarchia identificata nel §XIV.2, il criterio di Feynman si applica in modo diverso ai tre livelli.

Al primo livello (strutture direttamente abitabili), il criterio di Feynman è ampiamente soddisfatto: il fisico esperto può derivare le stesse leggi di conservazione dalla simmetria del Lagrangiano, dall'invarianza dell'azione, dal formalismo hamiltoniano, dall'analisi delle equazioni del moto — almeno quattro vie diverse che convergono sullo stesso risultato. Questa convergenza da strade diverse è precisamente ciò che Feynman intendeva come comprensione: la prova che la struttura fisica è realmente compresa, non solo calcolata.

Al secondo livello (strutture abitabili attraverso il formalismo), il criterio di Feynman è parzialmente soddisfatto: si può derivare il numero di Chern come integrale della curvatura di Berry, come indice topologico di un operatore di proiezione, come invariante di

winding del mappe dalla zona di Brillouin alla sfera di Bloch, e come coefficiente della risposta Hall. Quattro vie convergenti — ma richiedono tutte una competenza nel formalismo geometrico che non è della stessa accessibilità cognitiva immediata delle vie multiple del teorema di Noether.

Al terzo livello (strutture cognitivamente inabitabili), il criterio di Feynman è soddisfatto solo parzialmente e in modo diverso: si può calcolare l'entanglement entropy in molti modi — come entropia di von Neumann della matrice densità ridotta, come funzione dei coefficienti di Schmidt, come limite di entropie di Rényi — ma non si può costruire due immagini fisiche dell'entanglement nel senso di Feynman. L'entanglement non ha immagini fisiche: ha rappresentazioni formali. La comprensione dell'entanglement, al terzo livello della gerarchia, soddisfa il criterio di Feynman nella sua componente formale ma non nella sua componente cognitivo-percettiva.

XIV.4 — Sistemi artificiali e i tre livelli della comprensione

La gerarchia identificata nelle sezioni precedenti offre uno schema preciso per caratterizzare le capacità e i limiti dei sistemi artificiali nella comprensione fisica.

Al terzo livello — le strutture cognitivamente inabitabili — i sistemi artificiali avanzati si comportano in modo comparabile al fisico esperto: entrambi navigano nel formalismo senza abitare direttamente le strutture. La differenza è di natura, non di grado: il fisico esperto naviga nel formalismo dell'entanglement avendo costruito la comprensione dei livelli inferiori — sa cosa significa abitare una struttura fisica, e riconosce che l'entanglement non è abitabile in questo senso. Il sistema artificiale naviga nel formalismo dell'entanglement senza avere accesso a nessun livello della gerarchia: non ha strutture cognitive del primo livello con cui confrontare l'inabitabilità del terzo.

Al secondo livello — le strutture abitabili attraverso il formalismo — la differenza è più marcata. Il fisico che ha costruito l'intuizione geometrica della topologia porta con sé una struttura cognitiva che si è costruita attraverso l'esperienza con oggetti geometrici concreti: nastri di Möbius, fibrati su sfere, curve chiuse su varietà. Questa esperienza costruisce i nodi senso-motori del modello III del Capitolo IX. Il sistema artificiale che classifica fasi topologiche ha appreso pattern nelle strutture a bande — pattern che correlano con la topologia non-triviale — ma non ha costruito l'intuizione geometrica attraverso l'esperienza con oggetti geometrici concreti. La differenza è misurabile attraverso la qualità della generalizzazione: il fisico con intuizione geometrica generalizza a sistemi topologici nuovi attraverso la struttura; il sistema artificiale generalizza attraverso i pattern, e può fallire su strutture topologiche nuove che si trovano fuori dalla distribuzione dei dati di addestramento.

Al primo livello — le strutture direttamente abitabili — la differenza è la più profonda e la più difficile da colmare. Le simmetrie di un sistema fisico sono percepibili direttamente per il fisico che ha costruito una sensibilità alle strutture invarianti attraverso anni di esposizione a sistemi fisici reali, in laboratorio e nel lavoro teorico. Il sistema artificiale può imparare a identificare le simmetrie di un Lagrangiano — può imparare a riconoscere i pattern formali che indicano un'invarianza — ma non le «vede» nel senso della lettura della natura: non ha la struttura percettiva che precede e orienta la formalizzazione. L'assenza dei nodi senso-motori del modello III, che si costruiscono solo attraverso l'esperienza fisica incorporata, è la differenza fondamentale al primo livello della gerarchia.

XIV.5 — Conclusione: la natura, il fisico, la macchina

La fisica del Novecento ha prodotto tre strutture formali — la meccanica lagrangiana con il teorema di Noether, la geometria dello spazio dei parametri con la fase di Berry, la teoria delle correlazioni quantistiche con l'entanglement — che documentano, in modo complementare e con crescente complessità, la tesi che questa

monografia ha costruito attraverso i sei blocchi: la comprensione fisica è una struttura cognitiva che il formalismo non esaurisce, ma che il formalismo rende possibile nella sua forma più avanzata.

Il teorema di Noether mostra che la comprensione delle simmetrie — la lettura più diretta e abitabile della natura — è ciò che precede e organizza il formalismo, non ciò che ne risulta. La fase di Berry mostra che il formalismo può estendere la comprensione fisica a strutture non direttamente percepibili, producendo una forma di intuizione geometrica mediata che è genuina comprensione — non calcolo. L'entanglement mostra il limite di questa estensione: ci sono strutture della natura che il formalismo descrive con completezza arbitraria, ma che nessuna struttura cognitiva umana può abitare direttamente.

Il fisico esperto si muove fluidamente tra questi tre livelli: legge le simmetrie direttamente, coglie la topologia attraverso l'intuizione formale, naviga nell'entanglement attraverso gli strumenti. Questa mobilità tra i livelli — questa capacità di costruire ponti tra la lettura diretta, la lettura formalmente mediata e la navigazione nel formalismo — è la struttura cognitiva dell'expertise fisica nella sua forma più matura. Non è riducibile né alla sola intuizione fisica né al solo formalismo matematico: è la forma specifica di intelligenza che la fisica moderna ha prodotto attraverso tre secoli di interazione tra mente umana e struttura matematica della natura.

I sistemi artificiali — da FermiNet ai modelli linguistici di grandi dimensioni — operano in modo potente e crescente a tutti e tre i livelli, ma senza la struttura verticale che connette il terzo livello al secondo e il secondo al primo. Possono navigare nel formalismo dell'entanglement; possono classificare fasi topologiche; possono identificare simmetrie di gauge. Ma lo fanno come operazioni separate, senza la struttura cognitiva che per il fisico esperto le connette in una gerarchia unificata di comprensione. Il fisico esperto sa, dall'interno, cosa significa abitare una struttura fisica e cosa significa non poterla abitare. Il sistema artificiale non ha questa metariflessione sulla propria comprensione — non ha accesso alla

differenza tra i tre livelli della gerarchia — perché non ha mai abitato nessuna struttura fisica nel senso del primo livello.

Questa differenza non è un limite tecnologico provvisorio, destinato a essere superato con la prossima generazione di sistemi artificiali più potenti. È una differenza strutturale che emerge dalla natura del processo attraverso cui la comprensione fisica si costruisce: attraverso l'esperienza incorporata con il mondo fisico, l'apprendistato con un esperto, la pratica deliberata in contesti fisicamente variati. Finché i sistemi artificiali non avranno accesso a questi meccanismi — finché non potranno costruire i nodi senso-motori del modello III del Capitolo IX attraverso l'interazione fisica con il mondo — opereranno nel terzo livello della gerarchia senza avere accesso ai primi due. Potranno essere strumenti straordinari nelle mani dei fisici — e lo sono già — ma non potranno essere fisici nel senso della lettura della natura che questa monografia ha analizzato.

La natura, nel frattempo, rimane indifferente a questa distinzione. Essa ha una struttura che si lascia descrivere dal formalismo con completezza arbitraria — e che si lascia abitare cognitivamente solo in parte, solo dai sistemi che hanno costruito la struttura percettiva necessaria attraverso l'esperienza diretta. Il problema della comprensione fisica è, in ultima analisi, il problema del rapporto tra la struttura matematica della natura e la struttura cognitiva dei sistemi che la esplorano. La fisica del Novecento ha mostrato che questo rapporto è più complesso, più ricco e più misterioso di quanto qualsiasi filosofia della scienza del secolo precedente avesse anticipato.

Riferimenti: i principali riferimenti di questo capitolo di sintesi sono stati citati nei Capitoli XI, XII e XIII. Per il criterio di Feynman si rimanda al Complemento teorico §C.2 e all'Appendice M. Per la teoria della comprensione fisica e il confronto con i sistemi artificiali si rimanda ai Blocchi II, V e VI e alle Appendici AC e AF. Per la gerarchia degli invarianti topologici e i loro fondamenti matematici si rimanda all'Appendice V.

Appendice A — Il sistema assiomatico della meccanica quantistica

Nota per il lettore. Questa appendice espone il sistema assiomatico di von Neumann–Dirac in forma sistematica e assiomatica, con numerazione esplicita degli assiomi. Il § 1.1–1.4 del Blocco I tratta lo stesso formalismo in forma motivata e narrativa, privilegiando la costruzione concettuale rispetto alla sistematicità. Le due esposizioni sono complementari: il Blocco I aiuta a capire perché il formalismo ha la struttura che ha; questa appendice serve a verificare con precisione la struttura assiomatica e a ritrovare i risultati nella loro forma più compatta. Il lettore che trova un rimando a «gli assiomi di von Neumann–Dirac» nel testo principale può trovare qui la formulazione canonica, e nel Blocco I la motivazione fisica.

La formulazione assiomatica della meccanica quantistica che il Blocco I utilizza implicitamente merita di essere esposta in forma esplicita e sistematica, perché la struttura degli assiomi — e i silenzi tra di essi — è essa stessa filosoficamente rilevante per la tesi della monografia.

A.1 — Gli assiomi di von Neumann-Dirac

Il sistema standard adotta cinque assiomi, che qui si formulano nella versione più precisa matematicamente.

Assioma 1 (Spazio degli stati). Ad ogni sistema fisico S è associato uno spazio di Hilbert separabile H_S su C. Lo stato puro di S è

rappresentato da un vettore unitario $|\psi\rangle \in H_S$, a meno di fase globale: due vettori $|\psi\rangle$ e $e^{i\theta}|\psi\rangle$ rappresentano lo stesso stato fisico. Più in generale, lo stato di S è descritto da un operatore densità ρ su H_S: un operatore lineare, autoaggiunto, positivo semidefinito, a traccia unitaria.

Assioma 2 (Osservabili). Ad ogni grandezza fisica osservabile è associato un operatore autoaggiunto A su H_S. Gli autovalori di A — gli elementi dello spettro $\sigma(A)$ — sono i soli valori che la misura di A può produrre.

Assioma 3 (Regola di Born). Se il sistema è nello stato ρ, la probabilità di ottenere l'autovalore a_k dalla misura di A è:

$$p(a_k) = Tr\left(\rho\, P_{a_k}\right),$$

dove P_{a_k} è il proiettore spettrale associato all'autovalore a_k. Il valore atteso di A è $\langle A \rangle = Tr(\rho A)$.

Assioma 4 (Evoluzione temporale). Se il sistema è isolato, lo stato $\rho(t)$ evolve secondo l'equazione di Liouville-von Neumann:

$$i\hbar\,\dot{\rho} = [H, \rho],$$

equivalentemente $\rho(t) = U(t)\rho(0)U^{\dagger}(t)$ con $U(t) = e^{-iHt/\hbar}$. Per stati puri, l'equazione si riduce all'equazione di Schrödinger.

Assioma 5 (Sistemi composti). Il sistema composto S_{AB} di due sistemi S_A e S_B è descritto dallo spazio $H_{AB} = H_A \otimes H_B$. Lo stato ridotto di S_A nel sistema composto con stato ρ_{AB} è $\rho_A = Tr_B(\rho_{AB})$.

A.2 — Il sesto assioma implicito: il postulato del collasso

I cinque assiomi di von Neumann-Dirac non sono chiusi rispetto alla misura. La regola di Born (Assioma 3) specifica le probabilità dei risultati ma non descrive l'evoluzione dello stato durante e dopo la misura. Per descrivere misure successive, si aggiunge tradizionalmente un sesto postulato:

Assioma 6 (Collasso). Dopo una misura che ha prodotto il risultato a_k, lo stato del sistema diventa $\rho' = P_{a_k} \rho P_{a_k} / Tr\left(P_{a_k} \rho\right)$.

Questo assioma è il punto di rottura del sistema: il collasso è non lineare, irreversibile, e non derivabile dall'Assioma 4. Il problema della misura consiste precisamente nell'incompatibilità tra l'Assioma 4 (evoluzione unitaria, lineare, reversibile) e l'Assioma 6 (collasso, non lineare, irreversibile). Le diverse interpretazioni della meccanica quantistica sono, formalmente, diverse strategie per gestire questa incompatibilità: alcune modificano l'Assioma 6 (GRW, meccanica di Bohm), alcune lo eliminano (Everett), alcune lo reinterpretano come aggiornamento bayesiano (QBism).

Il fatto che il sistema assiomatico non sia chiuso — che richieda un sesto assioma incompatibile con il quarto — è la struttura formale del paradosso della completezza: il formalismo predittivo è completo, ma il sistema assiomatico non lo è in senso filosofico.

Appendice B — Il teorema di Bell e le disuguaglianze CHSH

Il teorema di Bell (1964) è la dimostrazione più importante della fisica del ventesimo secolo dal punto di vista filosofico: mostra che qualsiasi teoria a variabili nascoste *locali* produce predizioni quantitativamente diverse da quelle della meccanica quantistica, e che gli esperimenti confermano le predizioni quantistiche.

B.1 — Presupposti e formulazione

Consideriamo due particelle A e B in uno stato entangled, separate spazialmente. Il problema è se le correlazioni quantistiche tra misure su A e misure su B possono essere spiegate da variabili nascoste locali λ — variabili che specificano lo stato «reale» del sistema e che determinano, dato λ, il risultato di qualsiasi misura.

Presupposto di realismo locale: esiste una variabile nascosta λ distribuita secondo una distribuzione di probabilità $p(\lambda)$ tale che il

risultato $A\left(\hat{a},\lambda\right)\in\{-1,+1\}$ della misura di A lungo la direzione $\hat{a}$ dipende solo da $\hat{a}$ e λ (non dall'impostazione $\hat{b}$ del rivelatore di B, e viceversa). Questa è la condizione di *località*: le due misure non si influenzano.

Nella formulazione CHSH (Clauser, Horne, Shimony, Holt, 1969), si considerano quattro impostazioni — due per ciascun rivelatore: $\hat{a},\hat{a}'$ per A e $\hat{b},\hat{b}'$ per B. Si definisce la quantità:

$$S = A\left(\hat{a}\right)B\left(\hat{b}\right) + A\left(\hat{a}\right)B\left(\hat{b}'\right) + A\left(\hat{a}'\right)B\left(\hat{b}\right) - A\left(\hat{a}'\right)B\left(\hat{b}'\right).$$

Poiché $A,B\in\{-1,+1\}$, per ogni valore di λ si ha $|S(\lambda)|\leq 2$: l'algebra elementare mostra che $\left|\left[B\left(\hat{b}\right)+B\left(\hat{b}'\right)\right]\right|+\left|\left[B\left(\hat{b}\right)-B\left(\hat{b}'\right)\right]\right|=2$, dunque uno dei due termini vale 0 e l'altro 2. Integrando su λ:

$$|S| = \left|\int S(\lambda)\,p(\lambda)\,d\lambda\right| \leq \int |S(\lambda)|\,p(\lambda)\,d\lambda \leq 2.$$

Questa è la **disuguaglianza CHSH**: $|S|\leq 2$, necessariamente soddisfatta da qualsiasi teoria a variabili nascoste locali.

B.2 — La violazione quantistica e il limite di Tsirelson

La meccanica quantistica predice che per lo stato di Bell $|\Phi^+\rangle = (|00\rangle + |11\rangle)/\sqrt{2}$ e impostazioni angolari ottimali ($\hat{a}$ e $\hat{a}'$ separate di 90°, $\hat{b}$ a 45° tra i due), il correlatore diventa:

$$\langle \sigma_{A,\hat{n}}\,\sigma_{B,\hat{m}} \rangle = -\cos\theta_{nm},$$

dove θ_{nm} è l'angolo tra le direzioni $\hat{n}$ e $\hat{m}$. Con la scelta $\theta_{ab}=\theta_{ab'}=\theta_{a'b}=45°$ e $\theta_{a'b'}=135°$:

$$S_{QM} = 3\cos 45° - \cos 135° = \frac{3}{\sqrt{2}} + \frac{1}{\sqrt{2}} = 2\sqrt{2}.$$

Il valore $2\sqrt{2}$ è il **limite di Tsirelson** — il massimo quantisticamente raggiungibile — che viola la disuguaglianza CHSH per un fattore $\sqrt{2}$.

Gli esperimenti di Aspect et al. (1982), e successivamente i test «senza scappatoie» (Hensen et al. 2015, Giustina et al. 2015, Shalm et al. 2015), confermano la violazione della disuguaglianza CHSH in accordo con le previsioni quantistiche. La conclusione è che la natura

è non-locale nel senso precisato da Bell: le correlazioni quantistiche non possono essere spiegate da nessuna variabile nascosta locale, qualunque essa sia.

B.3 — Implicazione per la comprensione fisica

Il teorema di Bell è rilevante per la tesi della monografia in modo diretto: la non-località quantistica è un esempio paradigmatico di struttura fisica che il formalismo gestisce correttamente — le previsioni della meccanica quantistica per i correlatori di Bell sono esatte — ma che resiste alla comprensione nel senso cognitivo. Non esiste nessun modello «meccanicistico» locale della non-località quantistica: il tentativo di costruirne uno porta alla violazione della relatività speciale o alla non-determinatezza ontologica. La lettura della natura si interrompe qui — non perché il fisico sia incapace, ma perché il dominio non si lascia abitare nel modo in cui la fisica classica si lasciava abitare.

Appendice C — Il teorema di Gleason e la derivazione della regola di Born

Il teorema di Gleason (1957) mostra che la regola di Born non è un postulato indipendente: è l'unica forma possibile per una misura di probabilità su un sottospazio dello spazio di Hilbert, dato che lo spazio abbia dimensione almeno tre.

C.1 — Enunciato formale

Sia H uno spazio di Hilbert reale o complesso di dimensione $n \geq 3$. Una **funzione di frame** è una mappa $f: L(H) \to [0, 1]$ dall'insieme $L(H)$ dei sottospazi chiusi di H ai reali in $[0, 1]$, tale che:

1. $f(\{0\}) = 0$, $f(H) = 1$;

2. se $\{V_i\}$ è una famiglia di sottospazi mutualmente ortogonali con $\oplus_i V_i = H$, allora $\sum_i f\left(V_i\right) = 1$.

Teorema (Gleason, 1957): Per $n \geq 3$, ogni funzione di frame f su H è della forma:

$$f(V) = Tr\left(\rho P_V\right),$$

per un unico operatore densità ρ su H, dove P_V è il proiettore sul sottospazio V.

C.2 — Significato filosofico

Il teorema di Gleason mostra che la regola di Born non è una scelta arbitraria tra regole possibili: è l'unica funzione di probabilità consistente con la struttura lineare di H per $n \geq 3$. In dimensione due (sistemi a due livelli, qubit) il teorema non vale: esistono funzioni di frame non derivabili da operatori densità, il che spiega perché i sistemi a due livelli siano il banco di prova naturale per teorie a variabili nascoste.

Il teorema ha implicazioni dirette per alcune interpretazioni della meccanica quantistica: le teorie a variabili nascoste *non contestuali* — che assegnano valori definiti a tutte le osservabili simultaneamente, indipendentemente dal contesto di misura — sono incompatibili con il teorema di Gleason in $n \geq 3$. Questo è il nucleo del teorema di Kochen-Specker (Appendice D).

La condizione $n \geq 3$ non è tecnica ma fisicamente sostanziale: la meccanica quantistica del mondo reale — con sistemi che hanno infiniti gradi di libertà — soddisfa abbondantemente questa condizione, e la regola di Born è in questo senso non un postulato ma una conseguenza della struttura geometrica dello spazio degli stati.

Appendice D — Il teorema di Kochen-Specker: contestualità e limiti alle variabili nascoste

Il teorema di Kochen-Specker (1967) è una dimostrazione di impossibilità più forte del teorema di Bell nella sua portata filosofica: mostra che non è possibile assegnare valori predefiniti a tutte le osservabili quantistiche in modo consistente con la struttura

algebrica degli operatori — indipendentemente da qualsiasi assunzione di località.

D.1 — Il problema della colorazione dello spazio di Hilbert

Il teorema studia se sia possibile assegnare a ogni osservabile A un valore $v(A) \in \sigma(A)$ — un elemento dello spettro — in modo da rispettare le relazioni funzionali tra osservabili compatibili. Formalmente, si chiede una **mappa di colorazione** $v: O \to R$ dall'insieme delle osservabili ai reali, tale che:

- $v(A) \in \sigma(A)$ (i valori assegnati sono possibili risultati di misura);

- se $[A, B] = 0$ e $C = f(A, B)$, allora $v(C) = f(v(A), v(B))$ (coerenza funzionale per osservabili compatibili).

Teorema (Kochen-Specker, 1967): Per $n \geq 3$, non esiste nessuna mappa di colorazione v con le proprietà sopra.

D.2 — La costruzione in R^3

In dimensione tre, il teorema può essere dimostrato combinatorialmente. Si consideri l'insieme S degli operatori di proiezione $\pi_v = |v\rangle\langle v|$ sui vettori unitari $v \in S^2$. La coerenza funzionale richiede che per ogni terna ortonormale $\{v_1, v_2, v_3\}$ (una base ortonormale di R^3), la colorazione $v: \pi_v \mapsto \{0, 1\}$ soddisfi: esattamente uno tra $v\left(\pi_{v_1}\right), v\left(\pi_{v_2}\right), v\left(\pi_{v_3}\right)$ vale 1 e gli altri due valgono 0.

Kochen e Specker costruirono un insieme finito di 117 vettori in S^2 per cui nessuna colorazione di questo tipo esiste: qualsiasi tentativo di colorare i vettori porta a una contraddizione. La costruzione è stata successivamente semplificata; Cabello (1994) la riduce a 18 vettori in R^4.

D.3 — Contestualità come conseguenza

Il teorema di Kochen-Specker implica la **contestualità** della meccanica quantistica: il valore del risultato di una misura di A

dipende non solo dall'osservabile A ma dal contesto in cui viene misurata — cioè dall'insieme di osservabili compatibili con A che vengono misurate contemporaneamente. Non esiste un valore «oggettivo» di A indipendente dal contesto: assegnare valori definiti a tutte le osservabili, indipendentemente dal contesto, porta a contraddizioni. La meccanica di Bohm evita questo risultato perché è contestuale: la posizione ha un valore definito (la variabile nascosta), ma i valori di tutte le altre osservabili dipendono dalla guida contestuale della funzione d'onda.

Appendice E — Decoerenza: stima quantitativa delle scale temporali

La teoria qualitativa della decoerenza del § 1.4.3 acquista precisione fisica solo quando si quantificano le scale temporali a cui i termini di interferenza si sopprimono. Questa appendice calcola esplicitamente il tempo di decoerenza per un oggetto macroscopico in interazione con l'ambiente.

E.1 — Il modello di Caldeira-Leggett

Il modello standard per la decoerenza di un sistema S con coordinata x in interazione con un bagno termico a temperatura T è il modello di Caldeira-Leggett (1983). L'ambiente è un insieme di oscillatori armonici $\{(\omega_k, c_k)\}$ accoppiati linearmente alla coordinata del sistema:

$$H_{tot} = H_S + V(x) + \sum_k \left[\frac{p_k^2}{2m_k} + \frac{m_k \omega_k^2}{2} \left(q_k - \frac{c_k x}{m_k \omega_k^2} \right)^2 \right].$$

L'accoppiamento è caratterizzato dalla densità spettrale di accoppiamento $J(\omega) = \sum_k c_k^2 \delta(\omega - \omega_k)$, che nell'approssimazione ohmmica è $J(\omega) = M\gamma\omega$ per $\omega < \Omega$ (con Ω frequenza di cutoff).

E.2 — Evoluzione dell'elemento di matrice fuori diagonale

Tracciando sull'ambiente nell'approssimazione di Born-Markov, l'elemento di matrice fuori diagonale dell'operatore densità ridotto del sistema evolve come:

$$\rho_S(x, x', t) \approx \rho_S(x, x', 0)\, exp\Big(-\,\Gamma\,(x\,-\,x')^2\,t\Big),$$

dove il tasso di decoerenza è:

$$\Gamma\, = \frac{2M\gamma k_B T}{\hbar^2}.$$

Il **tempo di decoerenza** per una superposizione con separazione spaziale $\Delta x = |x - x'|$ è:

$$\tau_D = \frac{1}{\Gamma\,(\Delta x)^2}.$$

E.3 — Stime numeriche esplicite

Per un oggetto macroscopico di massa $M = 1\,g$ con separazione $\Delta x = 1\,\mu m,$ a temperatura ambiente $T = 300\,K$ in aria ($\gamma \approx 10^{\{-10\}\,\text{s}}\,\text{s}^{-1}$ per attrito molto debole; per interazione con i fotoni del fondo cosmico anche in vuoto spinto \tau_D \sim $10^{\{-18\}\,\text{s}}$ s⁻¹):

$$\tau_D \approx 10^{-35}\,s.$$

Il tempo di decoerenza per oggetti macroscopici è straordinariamente più breve del tempo di Planck. Per confronto, il tempo di decoerenza per un elettrone in superposizione con separazione $\Delta x = 1\,nm$ a temperatura $T = 1\,K$ è dell'ordine di millisecondi — scala su cui è sperimentalmente osservabile.

Questi calcoli quantificano perché le sovrapposizioni macroscopiche non si osservano mai: non è un fatto della limitazione sperimentale ma un fatto fisico con stima numerica precisa. La gatta di Schrödinger avrebbe un tempo di decoerenza molti ordini di grandezza più breve di qualsiasi scala temporale biologica.

Appendice F — Il problema Local Hamiltonian e la QMA-completezza

Il § 1.5 del Blocco I introduce il problema Local Hamiltonian come paradigma di limite strutturale della simulazione artificiale dei sistemi quantistici. Questa appendice fornisce la formulazione precisa del problema e la struttura della dimostrazione di QMA-completezza di Kitaev (2002).

F.1 — Definizione della classe QMA

QMA (Quantum Merlin-Arthur) è la classe dei problemi decisionali per cui esistono certificati quantistici efficacemente verificabili da un verificatore quantistico probabilistico. Formalmente, un problema L appartiene a QMA se esiste un circuito quantistico V polinomiale in $|x|$ tale che:

- **Completezza**: se $x \in L$, esiste uno stato quantistico $|\psi\rangle$ (il certificato) tale che V accetta $(x, |\psi\rangle)$ con probabilità almeno $2/3$;

- **Solidità**: se $x \notin L$, per ogni stato $|\psi\rangle$, V accetta $(x, |\psi\rangle)$ con probabilità al più $1/3$.

QMA è l'analogo quantistico di NP: BQP $\subseteq$ QMA (le macchine quantistiche possono risolvere i problemi QMA con certificati).

F.2 — Il problema Local Hamiltonian

Definizione: Il problema k-Local Hamiltonian è: dato un'hamiltoniana k-locale $H = \sum_{i=1}^{m} H_i$ su n qubit — dove ogni H_i agisce non trivialmente su al massimo k qubit — e due costanti $a < b$ con $b - a \geq 1/poly(n)$, determinare se l'autovalore minimo di H è minore di a (YES) o maggiore di b (NO).

Teorema (Kitaev, 2002): Il problema 5-Local Hamiltonian è QMA-completo. La riduzione successiva di Kempe, Kitaev, Regev (2006) mostra che anche il problema 2-Local Hamiltonian (con interazioni a due corpi) è QMA-completo.

F.3 — Schema della dimostrazione

La dimostrazione procede in due parti: (1) appartenenza a QMA, (2) QMA-hardness.

Appartenenza a QMA: Lo stato fondamentale $|\psi_0\rangle$ — se l'autovalore minimo è < a — è un certificato verificabile. Un verificatore quantistico: (i) riceve $|\psi_0\rangle$ come certificato; (ii) sceglie uniformemente un termine H_i; (iii) misura il valore atteso di H_i sul certificato e accetta se è inferiore alla soglia appropriata. Poiché $H = \sum_i H_i$, il test ha la completezza e la solidità richieste.

QMA-hardness: Kitaev costruisce una riduzione dal problema della verifica di computazioni quantistiche al Local Hamiltonian. L'idea è la **costruzione del clock**: si codifica una computazione quantistica $U_T \cdots U_1|0\rangle$ attraverso uno stato «storia» $\left|\eta\right\rangle = \sum_{t=0}^{T} U_t \cdots U_1 \left|0\right\rangle|t\rangle$, dove $|t\rangle$ è un registro clock. L'hamiltoniana locale H è costruita in modo da penalizzare le deviazioni dallo stato storia: il suo autovalore minimo è piccolo se e solo se la computazione accetta. Ogni termine dell'hamiltoniana coinvolge al più k qubit.

F.4 — Implicazioni per l'IA in fisica

La QMA-completezza del Local Hamiltonian implica che il problema di trovare lo stato fondamentale di un sistema quantistico generico è «difficile» anche per i computer quantistici — a meno che BQP = QMA, il che si ritiene improbabile. I sistemi di apprendimento automatico (reti neurali, FermiNet, ecc.) risolvono istanze particolari di questo problema sfruttando strutture fisiche specifiche — simmetrie, localizzazione dell'entanglement, invarianze — che riducono la difficoltà computazionale. Questa semplificazione è fisicamente motivata ma non è eseguita dai sistemi artificiali come un ragionamento sulla struttura fisica: è codificata nell'architettura o appresa dai dati.

Appendice G — DMRG e stati matrici-prodotto: entanglement e trattabilità

Il Density Matrix Renormalization Group (DMRG, White 1992, 1993) è il metodo computazionale più accurato per sistemi quantistici unidimensionali. Il suo successo è strettamente legato a una proprietà fisica precisa — l'area law per l'entanglement — che questa appendice formula e utilizza per giustificare la trattabilità computazionale.

G.1 — L'area law dell'entanglement

Per un sistema unidimensionale di n qubit con hamiltoniana k-locale e stato fondamentale $|\psi_0\rangle$, si considera una bipartizione del sistema in un sottosistema A (siti $1, ..., \ell$) e il suo complemento B (siti $\ell + 1, ..., n$). L'**entropia di entanglement** della bipartizione è:

$$S_A = -\,Tr\left(\rho_A log \rho_A\right),$$

dove $\rho_A = Tr_B\left(|\psi_0\rangle\langle\psi_0|\right)$.

Area law (Hastings, 2007): Per sistemi unidimensionali con gap spettrale, l'entropia di entanglement dello stato fondamentale è limitata superiormente da una costante indipendente dalla dimensione del sistema:

$$S_A \leq c \log D,$$

dove c dipende dal gap e dalla forza dell'interazione ma non da ℓ o n. Questa è la legge dell'area in una dimensione: l'entanglement attraverso il taglio $A|B$ è proporzionale all'«area» del taglio (un singolo sito in 1D), non al volume dei sottosistemi.

G.2 — Gli stati matrici-prodotto come classe di ansatz

Un **Matrix Product State** (MPS) su n siti con alfabeto fisico di dimensione d è uno stato della forma:

$$\left|\psi\right\rangle = \sum_{s_1,\ldots,s_n=1}^{d} Tr\left(A_1^{s_1} A_2^{s_2} \cdots A_n^{s_n}\right) \left| s_1 s_2 \cdots s_n \right\rangle,$$

dove $A_i^{s_i}$ sono matrici $D\times D$ (dimensione di bond D) per $i = 2, ..., n-1$ e vettori per $i = 1, n$. Il numero di parametri scala come $O\left(ndD^2\right)$.

Proposizione: L'entropia di entanglement di un MPS con dimensione di bond D è al più $logD$. Dunque un MPS con $D = e^c$ cattura esattamente stati con area law $S_A \leq c$.

L'area law di Hastings garantisce che lo stato fondamentale di sistemi unidimensionali con gap è bene approssimato da un MPS con D costante: il numero di parametri scala linearmente in n piuttosto che esponenzialmente.

G.3 — L'algoritmo DMRG come ottimizzazione nell'MPS manifold

Il DMRG è un algoritmo di ottimizzazione variazionale nella varietà degli MPS. L'idea è di minimizzare $\langle\psi\left(\{A_i\}\right)|H|\psi\left(\{A_i\}\right)\rangle/\langle\psi|\psi\rangle$ rispetto ai parametri $\{A_i\}$, aggiornando un tensore alla volta (sweep left-to-right e right-to-left) mentre gli altri vengono tenuti fissi. Ogni passo di aggiornamento è un problema agli autovalori generalizzato di dimensione $dD^2\times dD^2$, risolvibile con metodi di Lanczos in tempo $O\left(d^3D^3\right)$. Il costo computazionale totale per sweep scala come $O\left(nd^3D^3\right)$: polinomiale in n, polinomiale in D (che è costante per sistemi con gap).

La chiave per la comprensione del perché DMRG funziona è precisamente questa: non è un algoritmo generico applicato a un problema difficile, ma un algoritmo specificamente progettato per sfruttare l'area law come struttura fisica dei sistemi unidimensionali. Questa comprensione fisica non è presente nei sistemi di IA generici — è incorporata nel design dell'algoritmo da fisici che *capivano* la struttura dell'entanglement.

Appendice H — Analisi di co-evoluzione proteica: dal modello di Potts alla DCA

Il § 5.2 del Blocco V descrive il ruolo dell'MSA nella predizione della struttura proteica da parte di AlphaFold2. Questa appendice formalizza il metodo di *Direct Coupling Analysis* (DCA) che estrae coppie di residui in contatto dalla co-evoluzione delle sequenze.

H.1 — Il modello di Potts per le sequenze proteiche

Data una famiglia di proteine omologhe allineate, si dispone di un MSA con N_{seq} sequenze e L posizioni, dove ogni posizione i può assumere uno di $q = 21$ valori (venti amminoacidi più gap). La distribuzione della frequenza congiunta di due posizioni (i, j) è $f_{ij}(a, b)$ (la frequenza con cui all'allineamento la posizione i ha amminoacido a e la posizione j ha amminoacido b).

Il modello di Potts a massima entropia (Morcos et al. 2011) è la distribuzione di probabilità $P\left(a_1, ..., a_L\right)$ sulle sequenze di lunghezza L che riproduce le statistiche empiriche del primo e del secondo ordine ($f_i(a)$ e $f_{ij}(a, b)$) e massimizza l'entropia:

$$P\left(a_1, ..., a_L\right) = \frac{1}{Z} exp\left(\sum_i h_i\left(a_i\right) + \sum_{i<j} J_{ij}\left(a_i, a_j\right)\right),$$

dove $h_i(a)$ sono campi locali e $J_{ij}(a, b)$ sono accoppiamenti diretti. La funzione di partizione Z normalizza la distribuzione.

H.2 — Il problema dell'inversione della matrice di covarianza

Il legame tra le correlazioni osservate $c_{ij}(a, b) = f_{ij}(a, b) - f_i(a) f_j(b)$ e gli accoppiamenti diretti J_{ij} è non lineare (attraverso la funzione di partizione), ma nell'approssimazione di campo medio il legame si semplifica:

$$J_{ij}(a, b) \approx C_{ij}^{-1}(a, b),$$

dove C è la matrice di covarianza (di dimensione $L(q-1)\times L(q-1)$) e l'inversione $J \approx C^{-1}$ fornisce l'accoppiamento diretto. Il **DI score** (Direct Information) per la coppia (i, j) è:

$$DI(i,j) = \sum_{a,b} P^{(ij)}\left(a_i = a, a_j = b\right) log \frac{P^{(ij)}\left(a_i = a, a_j = b\right)}{f_i(a) f_j(b)},$$

calcolato dalla distribuzione derivata dai J_{ij}. I valori alti di DI segnalano accoppiate co-evoluzione diretta — e, per la selezione evolutiva che mantiene i contatti fisici, corrispondono a coppie di residui vicini nella struttura tridimensionale.

H.3 — Limiti del DCA come «comprensione» del ripiegamento

Il DCA estrae correttamente molti contatti strutturali, ma: (1) sfrutta pattern statistici evolutivi, non la fisica delle interazioni; (2) non è causalmente interpretabile — non descrive perché i residui (i, j) sono in contatto ma solo che tendono ad esserlo nelle sequenze evolutivamente selezionate; (3) fallisce per famiglie con poche sequenze omologhe (bassa copertura evolutiva), precisamente perché non ha la fisica come riferimento indipendente dalla statistica. AlphaFold2 usa DCA come segnale statistico, non come comprensione fisica: la distinzione tra i due è esattamente la distinzione tra prestazione e comprensione che il Blocco V argomenta.

Appendice I — Gli esperimenti mentali di Einstein: struttura cognitiva e formalizzazione

Il § 2.2 del Blocco II discute gli esperimenti mentali come pratica cognitiva che precede e orienta la matematica. Questa appendice classifica formalmente gli esperimenti mentali einsteiniani e ne analizza la struttura epistemologica.

App.I.1 — Classificazione tipologica

Brown (1991) e Norton (2004) propongono classificazioni divergenti degli esperimenti mentali in fisica. Ai fini di questa monografia si adotta una classificazione in tre tipi, basata sulla funzione epistemica:

Tipo I — Paradosso rivelatore: l'esperimento mentale mostra che una teoria produce conseguenze inaccettabili, motivando la sua revisione. Esempio: Einstein a 16 anni immagina di correre accanto a un'onda elettromagnetica alla velocità della luce — un'onda stazionaria che non esiste nelle soluzioni delle equazioni di Maxwell. L'inconsistenza rivela che la meccanica newtoniana e l'elettromagnetismo non possono coesistere senza modifica.

Tipo II — Costruttivo: l'esperimento mentale costruisce positivamente una struttura fisica nuova. Esempio: l'ascensore in caduta libera di Einstein mostra, attraverso la simulazione incarnata dell'equivalenza tra gravità e accelerazione, che la gravità non è una forza ma una proprietà della geometria dello spazio-tempo.

Tipo III — Critico-distruttivo: l'esperimento mentale mostra i costi ontologici di una teoria accettata. Esempio: il paradosso EPR (Einstein, Podolsky, Rosen, 1935) costruisce una situazione in cui la completezza della meccanica quantistica implica azione a distanza — un costo che Einstein ritiene inaccettabile. L'esperimento non dimostra che la meccanica quantistica è sbagliata, ma che è incompleta nel senso della tesi EPR.

App.I.2 — La struttura cognitiva comune

Tutti e tre i tipi condividono una struttura cognitiva: il fisico costruisce una rappresentazione interna del sistema fisico immaginato — un modello mentale che ha carattere spaziale, dinamico, causale — e ne *simula* l'evoluzione, identificando le conseguenze della simulazione. La simulazione è fisicamente guidata (non arbitraria) ma precede il calcolo formale.

Sia Ω l'insieme delle situazioni fisiche descrivibili in un linguaggio fisico L_{Ω}. Un esperimento mentale è una coppia (ω, σ) dove $\omega \in \Omega$ è la situazione immaginata e σ è l'operazione cognitiva di simulazione della sua evoluzione. Il risultato dell'esperimento mentale è una

proprietà P di σ(ω) che viola un'aspettativa o conferma una struttura congetturata. La struttura è:

$\sigma: \Omega \to \Sigma(\Omega) \to P$,

dove σ è la simulazione incarnata e l'estrazione di P è il riconoscimento di una struttura nella simulazione — un momento cognitivo che precede la formalizzazione matematica di P.

Appendice L — L'approccio algebrico alla meccanica quantistica: C*-algebre e il teorema GNS

Il formalismo degli spazi di Hilbert del Blocco I è l'approccio standard, ma esiste una formulazione alternativa e più astratta della meccanica quantistica — attraverso le C*-algebre degli osservabili — che ha il vantaggio di non presupporre la scelta di uno spazio di Hilbert specifico.

L.1 — C*-algebre degli osservabili

Una **C*-algebra** A è un'algebra di Banach su C dotata di un'involuzione *: $A \to A$ (con $a^{**} = a$, (ab)* = b^*a*, (\lambda a)^* = \bar{\lambda}a^*) tale che \|a^*a\| = \|a\|^2 ($condizione C$ *). $Gli osservabili fisici sono gli elementi autoaggiunti$ A = A^*$di \mathcal{A}$.

Uno **stato** nel senso algebrico è un funzionale lineare positivo normalizzato $\phi: A \to C$ con $\phi(1) = 1$ e $\phi\left(a^* a\right) \geq 0$ per ogni $a \in A$. Il valore atteso di A nello stato ϕ è $\phi(A)$.

L'esempio fondamentale è $A = B(H)$ (operatori limitati su uno spazio di Hilbert H), in cui il prodotto è la composizione, l'involuzione è il coniugato aggiunto, e gli stati corrispondono agli operatori densità ρ via $\phi_\rho(A) = Tr(\rho A)$.

L.2 — Il teorema GNS

Il **teorema di Gelfand-Naimark-Segal** (GNS, 1943-1950) mostra che la formulazione algebrica è equivalente, per ogni stato, alla formulazione hilbertiana:

Teorema: Per ogni stato ϕ su una C*-algebra A, esiste uno spazio di Hilbert H_ϕ, una rappresentazione $\pi_\phi: A \to B(H_\phi)$ e un vettore ciclico $|\Omega_\phi\rangle$ tali che $\phi(A) = \langle \Omega_\phi | \pi_\phi(A) | \Omega_\phi \rangle$.

La costruzione è esplicita: lo spazio H_ϕ è il completamento di A/N_ϕ rispetto al prodotto interno $\langle [a], [b] \rangle = \phi(a^* b)$, dove $N_\phi = \{a \in A : \phi(a^* a) = 0\}$ è l'ideale a sinistra.

L.3 — Superselection sectors e fenomeni collettivi

La formulazione algebrica è essenziale per la meccanica quantistica dei sistemi con infiniti gradi di libertà (quantum field theory, ferromagnetismo, superconduttività). In questi sistemi esistono stati ϕ_1 e ϕ_2 che definiscono rappresentazioni GNS π_{ϕ_1} e π_{ϕ_2} unitariamente non equivalenti: l'Hamiltoniana fisica non connette i due settori (superselection rules). Questo fenomeno — che non ha analogo per sistemi finiti — mostra che la scelta dello spazio di Hilbert non è innocente: stati fisici diversi corrispondono a spazi di Hilbert strutturalmente diversi, non collegati da alcuna trasformazione unitaria.

Per la tesi della monografia, l'approccio algebrico rinforza il punto del § 1.4: il problema della misura non scompare passando all'algebra C* — le relazioni tra stati puri, stati misti e collasso si ripropongono in termini di funzionali e ideali — ma la formulazione algebrica rende più visibile che il problema ha carattere strutturale e non dipende da scelte specifiche di rappresentazione.

Appendice M — Il criterio di Feynman: formalizzazione e applicazione ai sistemi artificiali

Il contenuto di questa appendice — la formalizzazione matematica del criterio di Feynman ($n(,A)$, $(,A)$), l'applicazione dettagliata alla legge di gravitazione universale con le cinque vie d'accesso, l'applicazione ad AI Feynman e AlphaFold, e la tavola sinottica comparativa per i principali sistemi artificiali — è stato integralmente assorbito nel § C.2 del Complemento teorico, che costituisce l'unico luogo della trattazione formale del criterio nell'opera. Il § C.2.4 contiene in particolare la tavola sinottica estesa (AI Feynman, AlphaFold2, FermiNet, NequIP) che questa appendice aveva anticipato. Si rimanda il lettore a § C.2 per la trattazione completa; eventuali rimandi interni all'opera a «Appendice M» vanno intesi come rimandi a § C.2 del Complemento teorico.

Appendice N — La geometria delle tre crisi: incompletezza formale, completezza predittiva, apertura interpretativa

Questa appendice formalizza la struttura comparativa delle tre monografie della serie, la cui convergenza emerge nel § 6.5 del Blocco VI e nel § C.4 del Complemento teorico.

N.1 — Tre strutture di eccedenza

Sia F un formalismo, C una capacità comprensiva, e definiamo il rapporto F/C come la relazione tra ciò che il formalismo produce e ciò che la comprensione richiederebbe. Le tre monografie analizzano tre istanze strutturalmente distinte di questo rapporto.

Giochi (*La navigazione del senso*): Il formalismo è completo nel senso triviale — le regole specificano tutto ciò che è necessario per determinare la vittoria. La capacità comprensiva eccedente $C\backslash F$ è la navigazione di significato: l'abilità di costruire modelli di senso che eccedono le regole, di attribuire intenzioni all'avversario, di orientarsi in situazioni non previste dalle regole attraverso schemi culturalmente e storicamente mediati. I sistemi artificiali hanno superato la capacità umana sul piano di F ma non possiedono $C\backslash F$. Struttura: $F\neq\emptyset$, $C\backslash F\neq\emptyset$.

Matematica (*La visione e la dimostrazione*): Il formalismo è *incompleto* nel senso gödeliano — esistono enunciati veri che il sistema formale non dimostra. La capacità comprensiva eccedente $C\backslash F$ è la visione di struttura: la capacità di «vedere» la verità di un enunciato gödeliano — di riconoscerne la verità attraverso una comprensione della struttura dei numeri naturali che eccede il sistema assiomatico. Struttura: $F \subsetneq C$, $C\backslash F \neq \emptyset$.

Fisica (*La lettura della natura*): Il formalismo è *predittivamente completo* — dodici cifre decimali di accordo sperimentale nell'elettrodinamica quantistica. La capacità comprensiva eccedente $C\backslash F$ è la lettura della natura: la costruzione di un modello fisicamente abitato del mondo che eccede la manipolazione del formalismo anche quando questo formalismo è completo. Struttura: $F \approx C_{pred}$, $C\backslash F \neq \emptyset$.

N.2 — La progressione di radicalità

Le tre strutture si ordinano in una progressione di radicalità crescente dell'eccedenza di C su F:

Nei giochi, F non cattura C perché F è banalmente incompleto rispetto alla ricchezza del dominio.

Nella matematica, F non cattura C per una ragione strutturale e dimostrabile — il teorema di Gödel — ma la capacità comprensiva eccedente è almeno concettualmente accessibile: il matematico può identificare gli enunciati gödeliani e argomentarne la verità.

Nella fisica quantistica, F non cattura C per una ragione ancora più radicale: il formalismo è predittivamente completo, l'apertura interpretativa non è empiricamente risolvibile, e la comprensione ontologica è parzialmente inaccessibile anche al fisico umano più capace — non per limitazione umana contingente ma per struttura del dominio. Heisenberg aveva ragione: la meccanica quantistica non si «capisce» nel senso in cui si capisce la meccanica newtoniana.

N.3 — La struttura comune: agente situato vs sistema astratto

Nelle tre monografie, la distinzione tra F e $C\backslash F$ corrisponde alla distinzione tra un sistema astratto che opera su simboli e un agente situato che abita un dominio. Il fisico, il giocatore esperto, il matematico creativo sono agenti situati: la loro comprensione è costruita attraverso l'esperienza del dominio, è fisicamente e cognitivamente incarnata, è non derivabile dal formalismo anche quando il formalismo è completo. I sistemi artificiali sono, in tutti e tre i casi, sistemi astratti che ottimizzano funzioni di perdita su strutture formali specificate: la loro «comprensione» non ha questa struttura.

Questa convergenza non è coincidenza: è la tesi unitaria della serie, formulata in tre istanze con livelli progressivi di radicalità.

Appendice O — Glossario del formalismo quantistico: termini tecnici con contesto fisico

Questo glossario non è un dizionario: è una raccolta di termini tecnici della meccanica quantistica presentati con il contesto fisico che ne motiva l'introduzione. La struttura è deliberatamente diversa da quella di un manuale: per ogni termine si indica non solo la definizione formale ma la ragione per cui quel termine è stato introdotto, la struttura fisica che cattura, e le connessioni con i termini correlati. Il lettore che ha attraversato i sei blocchi ritroverà qui strutture familiari in una presentazione sinottica; il lettore che consulta il glossario prima di leggere il testo troverà una mappa formale che i blocchi motiveranno.

Ampiezza di probabilità (probability amplitude). La quantità complessa A la cui norma quadra $|A|^2$ fornisce la probabilità di un evento quantistico. La natura complessa dell'ampiezza — e non la sua probabilità diretta — è il nucleo matematico del principio di sovrapposizione: le ampiezze si sommano, non le probabilità. Un'ampiezza può essere negativa o immaginaria; la probabilità

corrispondente è sempre non-negativa. L'interferenza quantistica — costruttiva o distruttiva — è il risultato della somma di ampiezze con diverse fasi. *Vedere*: regola di Born, principio di sovrapposizione.

Base (basis). Un insieme $\{|e_i\rangle\}$ di vettori di uno spazio di Hilbert tale che ogni stato $|\psi\rangle$ si possa scrivere come combinazione lineare $\left|\psi\rangle = \sum_i c_i \right| e_i\rangle$ (con $c_i \in C$). Una base è *ortonormale* se $\langle e_i | e_j \rangle = \delta_{ij}$. Ogni osservabile hermitiana ha una base di autovettori — la propria *base propria*. La scelta della base è cognitivamente rilevante: certi calcoli sono trasparenti in una base e opachi in un'altra; la scelta appropriata è parte del sapere tacito del fisico esperto.

Collasso della funzione d'onda (wavefunction collapse). Il processo postulato attraverso cui, al momento di una misura, la funzione d'onda di un sistema in uno stato di sovrapposizione $\left|\psi\rangle = \sum_k c_k \right| a_k\rangle$ «collassa» in uno degli autostati $|a_{k_0}\rangle$, con probabilità $\left|c_{k_0}\right|^2$. Il collasso è il *Processo 1* di von Neumann (§ 1.4.4): non deriva dall'evoluzione unitaria (*Processo 2*) ed è il nucleo del problema della misura. Le diverse interpretazioni della meccanica quantistica si distinguono esattamente per come trattano il collasso: Copenaghen lo postula come fatto primitivo; molti mondi lo elimina; Bohm lo sostituisce con la guida della funzione pilota; GRW lo modifica in un processo fisico stocastico.

Commutatore (commutator). Per due operatori $\hat{A}$ e $\hat{B}$, il commutatore è $\left[\hat{A}, \hat{B}\right] = \hat{A}\hat{B} - \hat{B}\hat{A}$. Se $\left[\hat{A}, \hat{B}\right] = 0$, i due operatori sono *compatibili*: hanno autostati comuni e i valori corrispondenti possono essere misurati simultaneamente con precisione arbitraria. Se $\left[\hat{A}, \hat{B}\right] \neq 0$, sono *incompatibili*: il principio di indeterminazione di Robertson impone un limite inferiore al prodotto delle incertezze. La relazione di commutazione canonica $\left[\hat{x}, \hat{p}\right] = i\hbar$ è l'axioma fondamentale della meccanica quantistica da cui si deriva l'equazione di Schrödinger.

Correlazione quantistica (quantum correlation). Una correlazione tra i risultati di misure su sistemi fisicamente separati che non può essere spiegata da variabili nascoste locali. Le correlazioni quantistiche degli stati entangled violano le disuguaglianze di Bell (§ D.2) e sono state verificate sperimentalmente. Non violano la causalità relativistica — non si può usarle per trasmettere informazione più veloce della luce — ma non hanno analogo nella fisica classica.

Decoerenza (decoherence). Il processo attraverso cui un sistema quantistico in uno stato di sovrapposizione perde le interferenze quantistiche per effetto dell'interazione con l'ambiente. Formalizzata attraverso la matrice densità ridotta (§ 1.4.3): i termini fuori-diagonale decadono su scale temporali determinate dalla natura e dalla forza dell'interazione sistema-ambiente. La decoerenza non risolve il problema della misura: spiega la soppressione delle interferenze macroscopiche ma non la selezione del risultato.

Degenerazione (degeneracy). La situazione in cui a un autovalore di un operatore hermitiano corrispondono più autovettori linearmente indipendenti. La degenerazione riflette tipicamente una simmetria del sistema: se l'hamiltoniana ha una simmetria di gruppo G, i livelli energetici si organizzano in multiplet di rappresentazioni irriducibili di G, e la degenerazione di un livello è la dimensione della rappresentazione corrispondente. La rimozione della degenerazione — attraverso perturbazioni che rompono la simmetria — è un potente strumento cognitivo per comprendere la struttura spettrale di sistemi complessi.

Entanglement (entanglement). La proprietà di uno stato $|\Psi\rangle$ di un sistema composito $H_A \otimes H_B$ di non essere fattorizzabile come $|\psi_A\rangle \otimes |\phi_B\rangle$. Un sistema entangled ha correlazioni tra le misure su A e B che non possono essere riprodotte da nessuna variabile nascosta locale (teorema di Bell). L'entanglement non è una proprietà classica mascherata da ignoranza: è una struttura non-separabile genuinamente quantistica. È la risorsa fisica delle tecnologie

quantistiche — computazione quantistica, crittografia quantistica, teletrasporto quantistico.

Funzione d'onda (wave function). La rappresentazione dello stato di un sistema quantistico nello spazio delle posizioni: $\psi(x,t) = \langle x|\psi(t)\rangle$. La funzione d'onda è un elemento di $L^2\left(R^3\right)$ e non è direttamente osservabile: $|\psi(x,t)|^2 d^3x$ è la probabilità di trovare la particella nel volume d^3x intorno a x al tempo t. La funzione d'onda porta la struttura completa delle interferenze quantistiche; la densità di probabilità $|\psi|^2$ porta solo le intensità. La distinzione ha conseguenze fisiche: esperimenti di interferenza sono sensibili alla fase di ψ, non solo a $|\psi|^2$.

Hamiltoniana (Hamiltonian). L'operatore $\hat{H}$ che genera l'evoluzione temporale attraverso l'equazione di Schrödinger $i\hbar\partial_t\left|\psi\right\rangle = \hat{H}\left|\psi\right\rangle$. In sistemi con corrispondenza classica, $\hat{H} = \hat{T} + \hat{V}$ è la somma dell'operatore energia cinetica e dell'operatore energia potenziale. Gli autovalori di $\hat{H}$ sono i livelli energetici del sistema; gli autostati sono gli stati stazionari, che evolvono con una pura fase $e^{-iE_n t/\hbar}$ senza cambiare la struttura probabilistica. La struttura dell'hamiltoniana — le sue simmetrie, la struttura spettrale, i gap energetici — è la principale fonte di comprensione fisica del sistema.

Misurabilità simultanea (simultaneous measurability). Due osservabili $\hat{A}$ e $\hat{B}$ sono simultaneamente misurabili — con precisione arbitraria — se e solo se $\left[\hat{A},\hat{B}\right] = 0$. Formalmente, la misurabilità simultanea equivale all'esistenza di una base comune di autovettori. La struttura delle osservabili compatibili e incompatibili per un dato sistema è una delle informazioni fisiche più ricche che il formalismo fornisce: determina quali «immagini classiche» del sistema sono fisicamente coerenti e quali sono necessariamente incomplete.

Operatore densità (density operator). L'operatore $\hat{\rho}$ che descrive lo stato di un sistema quando non si ha la piena conoscenza del vettore di stato — sia per ignoranza classica (stato misto statistico) sia per entanglement con un sistema esterno (stato misto ridotto). Soddisfa:

$\hat{\rho} = \hat{\rho}^{\dagger}$ (hermitiano), $\hat{\rho} \geq 0$ (semidefinito positivo), $tr\left(\hat{\rho}\right) = 1$ (normalizzazione). Uno stato puro soddisfa $\hat{\rho}^{2} = \hat{\rho}$; uno stato misto ha $tr\left(\hat{\rho}^{2}\right) < 1$. Il valore atteso di un'osservabile è $\langle \hat{A} \rangle = tr\left(\hat{\rho}\hat{A}\right)$.

Principio di corrispondenza (correspondence principle). Il principio di Bohr (1913) che i risultati della meccanica quantistica devono riprodurre quelli della meccanica classica nel limite dei grandi numeri quantici. Formalmente, il limite $\hbar \to 0$ (o equivalentemente $n \to \infty$ per grandi numeri quantici) dovrebbe produrre la meccanica classica. Il principio è guida euristica, non un teorema: la meccanica classica emerge in modo non uniforme dalla quantistica, e certi comportamenti classici (traiettorie ben definite, determinismo) non hanno un limite uniforme dalla struttura quantistica. L'integrale di cammino di Feynman dà la versione più precisa di questo limite: la meccanica classica emerge per interferenza costruttiva sulla traiettoria di azione stazionaria.

Regola di Born (Born rule). Il postulato interpretativo fondamentale della meccanica quantistica: la probabilità di ottenere il valore a_k nella misura dell'osservabile $\hat{A}$ su un sistema nello stato $|\psi\rangle$ è $p\left(a_k\right) = \left|\langle a_k | \psi \rangle\right|^2$. La regola di Born connette il formalismo matematico (i vettori di Hilbert) alle previsioni sperimentali (le probabilità dei risultati). Non è derivabile dagli assiomi del formalismo senza assunzioni aggiuntive: è il postulato che «mette in connessione» la matematica con la fisica. Le diverse interpretazioni della meccanica quantistica danno diverse giustificazioni alla regola di Born — e alcune (in particolare i molti mondi) ne affrontano la derivazione come problema non banale.

Simmetria di gauge (gauge symmetry). La proprietà di una teoria fisica di essere invariante rispetto a trasformazioni locali di un gruppo di simmetria G. La simmetria di gauge $U(1)$ della QED produce il campo del fotone; $SU(2) \times U(1)$ produce i bosoni $W^{\pm}$, Z^0 e il fotone; $SU(3)$ produce i gluoni. Le simmetrie di gauge non sono simmetrie osservabili: sono ridondanze nella descrizione matematica

che, quando richieste come principio costruttivo, impongono la forma dell'interazione. La struttura del modello standard delle particelle elementari è in larga misura determinata dalla struttura del gruppo di gauge $SU(3)\times SU(2)\times U(1)$.

Sovrapposizione (superposition). La proprietà della meccanica quantistica per cui un sistema fisico può esistere in una combinazione lineare di stati $\left|\psi\right\rangle = \sum_k c_k \left|a_k\right\rangle$, con $\left|c_k\right|^2$ la probabilità di trovare il sistema nell'autostato $|a_k\rangle$ se si misura l'osservabile $\hat{A}$. La sovrapposizione è una struttura dello spazio di Hilbert, non una descrizione dell'ignoranza: non significa che il sistema «sia» in uno degli stati $|a_k\rangle$ ma che non si sa quale — significa che la struttura fisica del sistema prima della misura non è un autostato di $\hat{A}$. La sovrapposizione produce interferenza; la sua soppressione dalla decoerenza rende i sistemi macroscopici «classici».

Spazio di Hilbert (Hilbert space). Lo spazio vettoriale complesso con prodotto interno che funge da spazio degli stati della meccanica quantistica. La struttura rilevante è: linearità (permette la sovrapposizione), prodotto interno (permette la regola di Born e la nozione di probabilità), completezza (garantisce che i limiti necessari esistano). La dimensione può essere finita (C^n per sistemi con numero finito di stati), numerabilmente infinita (ℓ^2), o non-numerabilmente infinita (L^2). La scelta della dimensione è determinata dalla struttura fisica del sistema.

Spin (spin). Il momento angolare intrinseco di una particella, senza analogo classico. Per un elettrone (spin $s = 1/2$), lo spin può assumere valori $m_s = \pm 1/2$ lungo qualsiasi asse di quantizzazione. Lo spazio degli stati di spin è C^2; gli operatori di spin sono proporzionali alle matrici di Pauli $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$. Lo spin è topologicamente vincolato: particelle con spin intero (bosoni) hanno funzione d'onda simmetrica sotto scambio; particelle con spin semi-intero (fermioni) hanno funzione d'onda antisimmetrica (principio di Pauli). Questa distinzione ha conseguenze

macroscopiche straordinarie: i bosoni tendono a condensare nello stesso stato (condensazione di Bose-Einstein), i fermioni no.

Appendice P — Le interpretazioni della meccanica quantistica: una tavola sinottica

Le cinque principali interpretazioni della meccanica quantistica sono presentate qui in forma comparativa, con l'indicazione delle strutture fisiche che ciascuna introduce o elimina rispetto al formalismo standard, delle difficoltà specifiche di ciascuna, e della tradizione filosofica in cui si inscrive.

P.1 — Il problema che le interpretazioni affrontano

Il problema della misura — articolato in §§ 1.4.1–1.4.4 — può essere formulato come trilemma: le tre proposizioni seguenti sono mutuamente inconsistenti.

(i) La funzione d'onda descrive completamente lo stato fisico del sistema.

(ii) La funzione d'onda evolve sempre secondo l'equazione di Schrödinger.

(iii) Le misure producono sempre un singolo risultato definito.

Le interpretazioni corrispondono a diverse scelte di quale proposizione abbandonare o modificare, o di come ridefinirne il contenuto per sciogliere l'inconsistenza.

P.2 — Interpretazione di Copenaghen

Formulazione originale: Bohr, Heisenberg (1927–1930). **Proposizione abbandonata**: (i), parzialmente.

L'interpretazione di Copenaghen risolve il trilemma sospendendo la domanda ontologica: la funzione d'onda non descrive la realtà del sistema fisico ma le possibilità di esito di esperimenti. Il «sistema fisico» non ha proprietà definite indipendentemente dalla misura; ha proprietà che si attualizzano nell'interazione con uno strumento di

misura classicamente descritto. Il confine tra sistema quantistico (descritto dalla funzione d'onda) e strumento di misura (descritto classicamente) — il *Heisenberg cut* — non è fisso: può essere spostato, ma deve esistere.

Forza: pragmaticamente consistente; produce le previsioni corrette senza ambiguità nel calcolo. **Difficoltà**: ontologicamente anti-realista (non descrive cosa il sistema *è*, solo cosa produce nelle misure); il Heisenberg cut è arbitrario e non giustificato formalmente; non applicabile a sistemi cosmologici (come quantizzare il cosmo se non c'è uno strumento esterno?).

Tradizione filosofica: positivismo logico; corrispondenza con la filosofia di Kant (la realtà noumenica è inaccessibile; la conoscenza è fenomenica).

P.3 — Meccanica dei molti mondi (Many-Worlds)

Formulazione: Everett (1957); sviluppo moderno Wallace (2012). **Proposizione abbandonata**: (iii).

La meccanica dei molti mondi afferma che (i) e (ii) sono entrambe vere: la funzione d'onda descrive completamente la realtà, e l'evoluzione è sempre unitaria. Quando si effettua una misura che produce due possibili risultati a e b, la funzione d'onda del sistema si *ramifica*: in un «ramo» il sistema ha risultato a, nell'altro ha risultato b. Entrambi i rami sono ugualmente reali; gli osservatori nei due rami sono ugualmente reali. Il risultato «casuale» che un osservatore sperimenta è un effetto prospettico della propria posizione in un singolo ramo di un'ontologia globalmente deterministica.

Forza: formalmente elegante; non richiede il collasso; unifica meccanica quantistica e relatività senza difficoltà di principio; applicabile alla cosmologia. **Difficoltà**: ontologia di universi paralleli infiniti — un costo ontologico che molti trovano eccessivo; la derivazione della regola di Born (perché $|c_k|^2$ è la probabilità soggettiva di trovarsi nel ramo k?) è tecnicamente sottile e controversa (approccio decision-teorico di Deutsch-Wallace).

Tradizione filosofica: realismo scientifico radicale; vicinanza con la meccanica classica per il determinismo della funzione d'onda.

P.4 — Meccanica di Bohm (variabili nascoste)

Formulazione: de Broglie (1927), Bohm (1952). **Proposizione modificata**: (ii).

La meccanica di Bohm mantiene (i) e (iii) aggiungendo all'ontologia una variabile nascosta: la posizione effettiva Q della particella, che ha sempre un valore definito. La funzione d'onda ψ non descrive la probabilità di trovare la particella in una posizione: descrive un campo fisico reale che «guida» la particella attraverso l'**equazione guida**:

$\frac{dQ}{dt} = \frac{\hbar}{m} Im\left(\frac{\nabla\psi}{\psi}\right)\Big|_Q$.

Il risultato «casuale» di una misura è determinato dalla posizione iniziale effettiva $Q(0)$, che non è conoscibile con precisione (per ragioni di principio legate all'equivarianza della distribuzione $|\psi|^2$): la casualità è epistemica, non ontologica.

Forza: completamente realista e determinista; la regola di Born è derivata, non postulata (teorema di equivarianza); produce la stessa fenomenologia della meccanica standard. **Difficoltà**: non-locale strutturale (la funzione d'onda dipende dalla posizione di tutte le particelle simultaneamente, e l'equazione guida è non-locale in spazio); il campo ψ di un sistema a N particelle vive in uno spazio configurazionale R^{3N}, non nello spazio fisico tridimensionale; l'estensione al caso relativistico è tecnicamente molto difficile.

Tradizione filosofica: realismo scientifico con variabili nascoste; Einstein avrebbe apprezzato la completezza e il determinismo.

P.5 — Teorie del collasso oggettivo (GRW/CSL)

Formulazione: Ghirardi, Rimini, Weber (1986); Pearle (1989). **Proposizione modificata**: (ii).

Le teorie GRW modificano la dinamica aggiungendo all'equazione di Schrödinger un termine stocastico non-lineare che produce collassi

spontanei della funzione d'onda. I parametri del modello — la frequenza di collasso per particella (10^{-16} s^{-1}) e la larghezza del collasso (10^{-7} m) — sono scelti per essere trascurabili per sistemi microscopici (dove il collasso è estremamente raro e la meccanica standard è recuperata) e dominanti per sistemi macroscopici (dove la funzione d'onda collassa quasi istantaneamente su scala microscopica).

Il collasso GRW è un processo fisico reale — non un postulato epistemico — che avviene in modo stocastico indipendentemente dalla presenza di osservatori. La discontinuità nella dinamica della funzione d'onda è fisica, non solo apparente.

Forza: risolve il problema della misura senza osservatori né variabili nascoste; la transizione da microscopico a macroscopico è quantitativa, non di principio; produce previsioni leggermente diverse dalla QM standard (collasso spontaneo di sistemi macroscopici), in linea di principio verificabili sperimentalmente. **Difficoltà**: i parametri del modello sono ad hoc; l'estensione relativistica (CSL) è tecnicamente complessa; si tratta di una modifica della meccanica quantistica, non di una sua interpretazione — un costo epistemico che molti fisici trovano eccessivo.

Tradizione filosofica: realismo scientifico con modificazione della teoria; vicina alla fisica delle particelle per lo spirito di modifica quantitativa testabile.

P.6 — Interpretazione relazionale

Formulazione: Rovelli (1996). **Proposizione ridefinita**: (i).

L'interpretazione relazionale propone che gli stati quantistici non siano proprietà assolute dei sistemi fisici ma relazioni tra sistemi: il valore di una variabile fisica esiste solo relativamente a un sistema di riferimento fisico. Non c'è un osservatore privilegiato rispetto al quale gli stati siano definiti; ogni sistema fisico può assumere il ruolo di «osservatore» rispetto ad altri. La meccanica quantistica descrive la struttura delle relazioni tra sistemi fisici, non le proprietà intrinseche di sistemi isolati.

Forza: naturalmente compatibile con la relatività; elimina il ruolo privilegiato degli osservatori umani; coerente con la struttura non-locale dell'entanglement (le correlazioni sono relazionali, non assolute). **Difficoltà**: la nozione di «relazione» richiede una chiarificazione ontologica non ovvia; la transizione da descrizione relazionale a esperienza soggettiva non è spiegata; l'interpretazione è meno sviluppata formalmente delle precedenti.

P.7 — Sintesi comparativa

	Copenaghen	Molti mondi	Bohm	GRW	Relazionale
Collasso reale	No (epistemico)	No	No	Sì	No
Particella con posizione definita	No	No	Sì	Sì (appross.)	No
Determinismo	No	Sì (globale)	Sì	No	No
Non-località	Implicita	Strutturale	Esplicita	Strutturale	Relazionale
Costo ontologico	Anti-realismo	Infiniti universi	Variabili nascoste	Parametri ad hoc	Ontologia relazionale
Compatibilità con QFT	Buona	Buona	Difficile	Difficile	Buona

La tavola non designa un vincitore: mostra che ogni interpretazione paga un costo ontologico diverso per mantenere coerenza logica. La scelta dell'interpretazione dipende da priorità filosofiche — realismo vs. anti-realismo, determinismo vs. indeterminismo, semplicità

ontologica vs. semplicità formale — che il formalismo da solo non risolve.

Appendice Q — Cronologia della rivoluzione quantistica: 1900–1945

Q.1 — Struttura della cronologia

La cronologia seguente non è un elenco di date ma una mappa della sequenza di crisi e soluzioni parziali attraverso cui la meccanica quantistica si è formata. Ogni entrata identifica: il fatto fisico o teorico che ha reso necessario un passo; il contributo che ha risposto al fatto; e la struttura cognitiva che quel contributo ha introdotto o trasformato.

Q.2 — La fase pionieristica (1900–1913): quantizzazione dell'energia

1900 — Planck: Per spiegare lo spettro del corpo nero senza la catastrofe ultravioletta (la divergenza dell'energia irradiata a frequenze alte prevista dalla fisica classica), Planck introduce la quantizzazione dell'energia: $E = h\nu$. Planck considera questa quantizzazione un *artificio matematico* — una «azione di disperazione» nelle sue stesse parole — non una proprietà fisica reale. Il corpuscolo di energia non è ancora reale.

1905 — Einstein: Per spiegare l'effetto fotoelettrico (l'energia degli elettroni emessi dipende dalla frequenza, non dall'intensità della luce), Einstein propone che la luce sia costituita di *quanti* reali — fotoni — con energia $E = h\nu$. Questa proposta, che valse ad Einstein il Nobel del 1921, va contro la teoria ondulatoria di Maxwell, che aveva trionfato nel XIX secolo. La dualità onda-corpuscolo emerge come struttura fisica reale, non come metafora.

1911 — Rutherford: Il modello planetario dell'atomo emerge dagli esperimenti di scattering di particelle alfa sull'oro: il nucleo atomico è una struttura densa e piccola, non una distribuzione diffusa come

nel modello di Thomson. Questo modello è classicamente instabile — un elettrone che orbita emette radiazione, perde energia, e collassa sul nucleo in 10^{-10} s. La fisica classica non può spiegare la stabilità degli atomi.

1913 — Bohr: Per spiegare lo spettro dell'idrogeno (le righe spettrali discrete di Balmer, Lyman, Paschen), Bohr postula orbite quantizzate: l'elettrone può orbitare solo su orbite con momento angolare $L = n\hbar$, e la transizione tra orbite emette un fotone con $E = h\nu$. Il modello di Bohr è inconsistente — combina meccanica classica per le orbite e quantizzazione postulata ad hoc — ma produce le previsioni corrette per l'idrogeno con precisione straordinaria.

Q.3 — La fase della meccanica matriciale e ondulatoria (1923–1927)

1923 — de Broglie: Estende la dualità onda-corpuscolo dal fotone a tutte le particelle materiali: ogni particella con impulso p ha una lunghezza d'onda associata $\lambda = h/p$. La proposta è speculativa e non motivata da dati diretti; la sua verifica sperimentale (diffrazione degli elettroni da Davisson e Germer nel 1927) è uno dei momenti più drammatici della storia della fisica.

1925 — Heisenberg: Costruisce la meccanica matriciale — il primo formalismo completo della meccanica quantistica — partendo dalla richiesta di abbandonare completamente la *Anschaulichkeit* (visualizzabilità). Le posizioni e i momenti non sono più numeri: sono **matrici** che non commutano. Il formalismo è costruito per riprodurre le frequenze e le intensità delle righe spettrali senza postulare traiettorie. È il primo esempio nella storia della fisica di una teoria costruita deliberatamente *senza* un modello fisico intuitivo come fondamento.

1925 — Born e Jordan: Interpretano il formalismo matriciale di Heisenberg e identificano la relazione di commutazione $\hat{x}\hat{p} - \hat{p}\hat{x} = i\hbar$ come struttura fondamentale. La differenza tra

posizione e momento non è più un limite tecnico della misura: è una struttura algebrica della teoria.

1926 — Schrödinger: Sviluppa la meccanica ondulatoria partendo dall'analogia con l'ottica: come la meccanica classica è il limite dell'ottica geometrica della meccanica ondulatoria, la meccanica quantistica potrebbe essere la struttura ondulatoria di cui la meccanica classica è il limite. L'equazione di Schrödinger $i\hbar\partial_t\psi = \hat{H}\psi$ è l'equazione d'onda del campo ψ. Schrödinger dimostra l'equivalenza formale della propria meccanica ondulatoria con la meccanica matriciale di Heisenberg; i due fisici si odiano.

1926 — Born: Interpreta $|\psi(x)|^2$ come densità di probabilità — non come densità di carica o distribuzione di massa. La funzione d'onda è una struttura probabilistica, non una struttura materiale. Questa interpretazione — la regola di Born — trasforma il significato dell'equazione di Schrödinger e produce la dualità onda-corpuscolo nella sua forma moderna.

1927 — Heisenberg: Formula il principio di indeterminazione $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$. Nella formulazione originale, interpretata come effetto perturbativo della misura; nella formulazione moderna, derivata dal teorema di Robertson, come proprietà strutturale degli stati quantistici.

1927 — Dirac: Unifica la meccanica matriciale e la meccanica ondulatoria nel formalismo degli spazi di Hilbert con la notazione bra-ket. Introduce la delta di Dirac $\delta(x)$ e il concetto di trasformazione unitaria tra rappresentazioni diverse. Il formalismo di Dirac è il linguaggio in cui la meccanica quantistica è attualmente insegnata.

Q.4 — La fase dell'interpretazione e della crisi (1927–1935)

1927 — Congresso Solvay: La discussione tra Bohr e Einstein sulle implicazioni della meccanica quantistica inaugura un dibattito che non si chiuderà. Einstein propone una serie di esperimenti mentali per mettere in crisi il principio di indeterminazione; Bohr risponde con analisi dettagliate degli apparati di misura che mostrano come il

principio si preservi. Il confronto stabilisce i termini del dibattito per i decenni successivi.

1927 — Bohr: Enuncia il principio di complementarità: onda e corpuscolo sono *modalità complementari* della descrizione fisica — si escludono a vicenda, e l'una non riduce l'altra. Un esperimento che rivela la natura ondulatoria distrugge l'informazione sulla natura corpuscolare, e viceversa. La complementarità è la risposta di Bohr al problema della dualità.

1932 — von Neumann: In *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, fornisce il primo trattamento matematicamente rigoroso della meccanica quantistica sugli spazi di Hilbert, articola la distinzione tra Processo 1 e Processo 2, e dimostra il teorema che esclude le variabili nascoste — un teorema poi corretto da Bell (1964).

1935 — Einstein, Podolsky, Rosen: Il paradosso EPR mette in luce la non-separabilità degli stati entangled come caratteristica strutturale della meccanica quantistica che Einstein ritiene incompatibile con il realismo locale. Il paper introduce il concetto di «elemento di realtà» e la domanda sulla completezza della meccanica quantistica che Bell risponderà nel 1964.

1935 — Schrödinger: Il paradosso del gatto di Schrödinger formalizza la tensione tra evoluzione unitaria e collasso come problema cognitivo e fisico. L'articolo che lo contiene introduce anche il concetto di *entanglement* come «la caratteristica peculiare della meccanica quantistica, quella che la distingue più nettamente dalle linee di pensiero classiche».

Q.5 — La fase della maturità e della QED (1940–1950)

1940–1947 — Schwinger, Feynman, Tomonaga: Sviluppano indipendentemente l'elettrodinamica quantistica rinormalizzata — la prima teoria quantistica dei campi con previsioni finite e verificabili. L'accordo con le misure dell'effetto Lamb e del momento magnetico anomalo dell'elettrone stabilisce la QED come la teoria fisica più accurata mai costruita.

1948 — Feynman: Propone l'integrale di cammino come terzo formalismo equivalente della meccanica quantistica, connettendolo esplicitamente all'azione classica e aprendo la via alla quantizzazione dei campi attraverso l'integrale funzionale.

La cronologia si ferma qui — non perché la storia si chiuda, ma perché a questo punto la meccanica quantistica ha raggiunto la forma che il Blocco I di questa monografia descrive. La storia successiva — la QCD, il modello standard, la superstringhe, l'informazione quantistica — è la storia dello sviluppo di quel formalismo, non del suo fondamento.

Appendice R — Il teorema di Bell e le sue verifiche sperimentali

R.1 — Il problema delle variabili nascoste locali

Il paradosso EPR (1935) aveva mostrato che la meccanica quantistica predice correlazioni tra sistemi separati che Einstein riteneva incompatibili con il realismo locale. La posizione di Einstein era che la meccanica quantistica fosse *incompleta*: le correlazioni EPR sarebbero state spiegate, in una teoria completa, da variabili nascoste — valori definiti di proprietà fisiche non catturate dal vettore di stato.

La domanda di Einstein era sperimentalmente inaccessibile finché rimase a livello di principio. Bell (1964) la rese accessibile: dimostrò che qualunque teoria con variabili nascoste *locali* deve soddisfare una classe di disuguaglianze — le **disuguaglianze di Bell** — che la meccanica quantistica viola.

R.2 — La disuguaglianza CHSH

Nella versione di Clauser, Horne, Shimony e Holt (1969), la disuguaglianza di Bell assume la forma:

$$|E(a,b) - E(a,b') + E(a',b) + E(a',b')| \leq 2,$$

dove $E(a,b)$ è il valore atteso del prodotto degli spin misurati su due particelle entangled nelle direzioni a e b rispettivamente. I valori a, a'

sono due direzioni di misura per la prima particella; b, b' sono due direzioni per la seconda.

Per due particelle in uno stato di singoletto $|\Psi^-\rangle = (|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle)/\sqrt{2}$, la meccanica quantistica predice:

$E(a, b) = -\cos\theta_{ab}$,

dove θ_{ab} è l'angolo tra le direzioni a e b. La massima violazione della disuguaglianza CHSH si ottiene per le direzioni $a = 0°$, $a' = 90°$, $b = 45°$, $b' = 135°$:

$|E(a, b) - E(a, b') + E(a', b) + E(a', b')| = 2\sqrt{2} \approx 2,83.$

Poiché $2\sqrt{2} > 2$, la meccanica quantistica viola la disuguaglianza CHSH. Nessuna teoria con variabili nascoste locali può riprodurre questa violazione.

R.3 — Le verifiche sperimentali

Clauser e Freedman (1972): Prima verifica sperimentale, usando fotoni da decadimento atomico. Risultato: violazione della disuguaglianza, in accordo con la meccanica quantistica. Lacune (*loopholes*): la bassa efficienza dei rivelatori richiedeva assunzioni aggiuntive; le misure non erano spazialmente separate abbastanza da escludere la comunicazione a velocità sub-luminare.

Aspect, Grangier e Roger (1982): Versione migliorata con fotoni correlati da cascata atomica, misure rapide delle polarizzazioni con orientazioni cambiate durante il volo dei fotoni (chiudendo il *loophole* della separazione spaziale). Violazione chiara della disuguaglianza di Bell, in accordo con QM.

Weihs, Jennewein, Simon, Weinfurter, Zeilinger (1998): Primo esperimento con scelta delle basi di misura realmente casuale e indipendente per le due stazioni, chiudendo il *loophole* della libertà di scelta. Violazione $> 30\sigma$ dalla previsione classica.

Hensen et al. (2015) (Delft), **Giustina et al. (2015)** (Vienna), **Shalm et al. (2015)** (NIST): Tre esperimenti «loophole-free» pubblicati nel 2015, che chiudono simultaneamente i loophole di separazione, efficienza e

scelta. Questi esperimenti, che valsero a Clauser, Aspect e Zeilinger il Premio Nobel per la Fisica del 2022, dimostrano in modo definitivo che la natura viola le disuguaglianze di Bell: il mondo non è descritto da variabili nascoste locali.

R.4 — Implicazioni fisiche e filosofiche

La violazione delle disuguaglianze di Bell ha tre implicazioni che meritano di essere distinte.

Prima implicazione — fisica: Il mondo non è localmente realistico nel senso di Einstein. Non esiste una descrizione delle particelle EPR attraverso variabili nascoste locali che riproduca tutte le previsioni della meccanica quantistica. Questo non significa necessariamente che il mondo sia «non-locale»: esistono interpretazioni della meccanica quantistica che sono non-locali (Bohm) e altre che ridefiniscono la nozione di «locale» in modo da evitare la conclusione (molti mondi, relazionale). Ma qualcosa nella struttura fisica del mondo differisce strutturalmente dall'immagine classica di Einstein.

Seconda implicazione — epistemica: La meccanica quantistica non è incompleta nel senso di EPR. Non esistono variabili nascoste locali che spiegherebbero le correlazioni EPR come manifestazioni di proprietà preesistenti. La meccanica quantistica è la migliore descrizione disponibile delle correlazioni quantistiche, e questa descrizione non può essere «completata» con variabili nascoste locali senza violare le previsioni sperimentali.

Terza implicazione — tecnologica: Le correlazioni non-locali degli stati entangled non permettono di trasmettere informazione più veloce della luce (il **teorema di no-communication** lo dimostra formalmente), ma possono essere usate come risorsa per compiti informatici che non hanno analogo classico: la **crittografia quantistica** (la chiave di sicurezza è garantita fisicamente dalle correlazioni EPR), il **teletrasporto quantistico** (la trasmissione dello stato quantistico di un sistema attraverso un canale classico e una coppia entangled), la **distribuzione quantistica di chiavi** (QKD). Queste tecnologie non si basano sulla velocità superluminare: si

basano sul fatto che qualsiasi intercettazione delle correlazioni EPR pertuba le correlazioni in modo rilevabile.

Appendice S — Analisi dimensionale e ordini di grandezza in fisica quantistica

S.1 — Le costanti fondamentali come strutture cognitive

Il sapere tacito del fisico esperto include — come sottolineato in §2.5.1 — il «senso degli ordini di grandezza»: la capacità di stimare immediatamente, senza calcolare, se un risultato fisico è plausibile. Questa capacità è radicata in una rete di conoscenze comparative sulle costanti fondamentali della natura, che il fisico usa come sfondo implicito di qualsiasi ragionamento quantitativo.

L'analisi dimensionale è lo strumento formale che questa capacità usa esplicitamente: ogni grandezza fisica ha dimensioni che si esprimono in termini delle dimensioni fondamentali (massa M, lunghezza L, tempo T, carica Q, temperatura Θ), e la correttezza dimensionale di un'equazione è una condizione necessaria — non sufficiente — per la sua correttezza fisica.

In meccanica quantistica, le costanti fondamentali che strutturano l'analisi dimensionale sono:

Costante	Simbolo	Valore	Dimensioni	Significato fisico
Costante di Planck ridotta		J·s		Quanto d'azione
Velocità della luce		m/s		Velocità di propagazione
Carica dell'elettrone		C		Carica fondamentale

Costante	Simbolo	Valore	Dimensioni	Significato fisico
Massa dell'elettrone		kg		Massa del leptone leggero
Costante di Boltzmann		J/K		Energia per grado termico
Costante di struttura fine			adimensionale	Forza dell'interazione EM

Le **unità naturali** — sistemi in cui $\hbar = c = k_B = 1$ — eliminano queste costanti dalle equazioni e rendono visibile la struttura dimensionale della fisica in modo più diretto. In unità naturali, energia, massa, impulso e temperatura hanno la stessa dimensione ([E] = [M] = [p] = [$k_B T$]), e le lunghezze hanno dimensioni di energia inversa ([L] = [E]$^{-1}$). La fisica delle alte energie lavora comunemente in unità naturali con l'elettronvolt (eV) come unità fondamentale.

S.2 — Scale caratteristiche della fisica quantistica

Alcune scale caratteristiche sono costruite a partire dalle costanti fondamentali e definiscono i *domini* in cui la fisica quantistica è rilevante.

Il raggio di Bohr $a_0 = \hbar^2/\left(m_e e^2\right) \approx 5,3 \times 10^{-11}$ m è la scala di lunghezza caratteristica dell'atomo di idrogeno. Sistemi di dimensione $\sim a_0$ sono nel dominio della meccanica quantistica atomica; sistemi molto più grandi di a_0 sono nel dominio classico per le grandezze atomiche.

L'energia di Rydberg $E_{Ry} = m_e e^4/\left(2\hbar^2\right) \approx 13,6$ eV è l'energia di legame dell'elettrone nell'orbita fondamentale dell'idrogeno. È la scala caratteristica delle energie atomiche: la fisica degli elettroni di valenza degli atomi avviene su scale di decine di eV; la fisica del

nucleo atomico su scale di MeV (10^6 eV); la fisica delle particelle elementari su scale di GeV (10^9 eV) e TeV (10^{12} eV).

La lunghezza d'onda termica de Broglie $\lambda_{th} = \sqrt{2\pi\hbar^2/\left(mk_B T\right)}$ è la scala di lunghezza sotto la quale gli effetti quantistici sono rilevanti per una particella a temperatura T. Per un gas di atomi di elio a temperatura ambiente ($T \approx 300$ K), $\lambda_{th} \approx 10^{-11}$ m — molto minore della distanza media tra atomi ($\sim 10^{-9}$ m): gli effetti quantistici di scambio sono trascurabili. Per un gas di elettroni in un metallo a $T = 300$ K, $\lambda_{th} \approx 10^{-9}$ m — comparabile con la distanza media tra elettroni: gli effetti quantistici sono dominanti, e il metallo è un sistema quantistico anche a temperatura ambiente.

Il tempo di Planck $t_P = \sqrt{\hbar G/c^5} \approx 5,4 \times 10^{-44}$ s e la **lunghezza di Planck** $\ell_P = \sqrt{\hbar G/c^3} \approx 1,6 \times 10^{-35}$ m sono le scale caratteristiche della gravità quantistica — il regime in cui gli effetti gravitazionali e quantistici sono comparabili. La fisica attuale non ha una teoria consistente per questo regime.

S.3 — Analisi dimensionale come strumento di scoperta

L'analisi dimensionale non è solo uno strumento di verifica: è uno strumento di scoperta. Combinando le costanti fondamentali in modo da ottenere le dimensioni della grandezza desiderata, si può spesso ottenere il risultato fisico corretto a meno di un fattore numerico adimensionale dell'ordine dell'unità.

Esempio — Raggio di Bohr: La grandezza cercata ha dimensioni $[L]$. Le costanti disponibili sono ħ, m_e, e. L'unica combinazione con dimensioni di lunghezza è:

$$\left[\frac{\hbar^2}{m_e e^2}\right] = \frac{\left(ML^2T^{-1}\right)^2}{M\cdot(Q)^2\cdot\ldots} = L.$$

(In unità SI, il calcolo richiede ϵ_0; in unità gaussiane, si ottiene direttamente $\hbar^2/\left(m_e e^2\right)$.) Il raggio di Bohr è esattamente questa combinazione.

Esempio — Energia di punto zero dell'oscillatore: Per un oscillatore armonico di massa m e frequenza ω, l'energia di punto zero deve avere dimensioni $\left[ML^2T^{-2}\right]$ e deve dipendere da ħ (perché è un effetto quantistico) e da ω (perché dipende dalla frequenza). L'unica combinazione è $\hbar\omega$, e il fattore 1/2 non è determinato dall'analisi dimensionale — ma viene dalle regole algebriche del commutatore $\left[\hat{a}, \hat{a}^\dagger\right] = 1$.

Esempio — Temperatura di Hawking: La temperatura associata all'evaporazione di un buco nero di massa M — un risultato che combina relatività generale, meccanica quantistica e termodinamica statistiche — deve avere dimensioni [Θ]. Le costanti rilevanti sono ħ (quantistica), G (gravitazionale), c (relativistica), M (massa del buco nero), k_B (termodinamica). L'unica combinazione con dimensioni di temperatura è:

$$T_H = \frac{\hbar c^3}{8\pi G M k_B}.$$

Questo risultato — derivato da Hawking nel 1974 attraverso un calcolo formale complesso — ha la forma esatta che l'analisi dimensionale produce, con un fattore adimensionale 1/(8π) che l'analisi dimensionale non determina. La struttura del risultato era quindi anticipabile per via dimensionale; il fattore numerico richiedeva il calcolo completo.

La capacità di eseguire questo tipo di ragionamento dimensionale — combinare le costanti rilevanti per anticipare la struttura del risultato prima del calcolo — è una componente fondamentale del sapere tacito del fisico esperto, e uno degli esempi più chiari di come la comprensione fisica preceda e orienti il calcolo formale.

Appendice T — Epistemologia delle prove lunghe: comprensione, verifica e la crisi del consenso matematico

Questa appendice analizza un fenomeno epistemologico specifico — le **prove matematiche e fisiche di lunghezza eccessiva** per la verifica umana diretta — che costituisce un caso limite rivelatore per la distinzione tra comprensione e verifica al centro della monografia. Le prove lunghe hanno prodotto una crisi nel concetto di «consenso della comunità» come base dell'accettazione matematica, e questa crisi è direttamente rilevante per la domanda su cosa significhi comprensione in un dominio in cui la verifica è delegata a sistemi automatici.

T.1 — La crisi delle prove computer-assisted: Appel-Haken e i suoi successori

Il teorema dei quattro colori (1976). La prima prova di un teorema matematico rilevante che richiedeva l'assistenza computazionale è la dimostrazione di Appel e Haken del **teorema dei quattro colori**: ogni mappa planare è colorabile con al più quattro colori in modo che regioni adiacenti abbiano colori distinti. La prova riduce il problema a 1.936 «configurazioni inevitabili» ciascuna delle quali viene verificata dall'algoritmo di Haken su un calcolatore IBM. La verifica computazionale richiede 1.200 ore di tempo macchina.

La risposta della comunità matematica è istruttiva. La prova è **accettata** come corretta e pubblicata sugli *Illinois Journal of Mathematics*. Ma la reazione di molti matematici — documentata nei resoconti di Appel (1977) e nelle successive discussioni — è che qualcosa è epistemologicamente insoddisfacente: la prova non è *comprendibile* nel senso in cui lo è la dimostrazione del teorema di Pitagora o del teorema di Gödel. Nessun matematico può tenere nella mente l'intera struttura dell'argomento; la verifica dipende dalla correttezza del programma e dell'hardware; l'intuizione su *perché* il teorema è vero — quale struttura combinatoria lo rende necessario — non è aumentata dalla prova. Tymoczko (1979) formalizza questa preoccupazione: la prova di Appel-Haken sfida la

concezione tradizionale della prova matematica come argomento che può essere «seguito e capito» da un essere umano in linea di principio.

La classificazione dei gruppi finiti semplici (1983). La classificazione completa dei gruppi finiti semplici — il risultato che ogni gruppo finito semplice appartiene a una delle categorie: ciclico di ordine primo, alternante A_n per $n \geq 5$, gruppi di Lie di tipo finito, o uno dei 26 gruppi sporadici — è stata completata nel 1983 attraverso contributi di centinaia di matematici in migliaia di articoli per un totale di circa **15.000 pagine**. Nessun singolo matematico ha letto l'intera prova; la «comprensione» del risultato è distribuita nella comunità, con diversi esperti che coprono porzioni diverse.

La classificazione è stata successivamente revisionata e semplificata nei decenni seguenti, ma la versione originale rimane l'esempio più estremo di prova matematica troppo lunga per qualsiasi singolo esperto. L'accettazione della classificazione come dimostrata è basata su: la verifica parziale di ciascun contributo da parte degli esperti della sottoarea corrispondente, la coerenza interna tra i contributi, l'assenza di contraddizioni rilevate in decenni di uso del risultato. Questa forma di accettazione distribuita è epistemologicamente diversa dall'accettazione di una prova individuale che un singolo matematico può seguire da cima a fondo.

T.2 — La struttura epistemica dell'accettazione distribuita

La crisi delle prove lunghe rivela una struttura epistemica nella matematica che era sempre stata presente ma che prove corte e abbellite avevano oscurato: l'accettazione di un risultato matematico non richiede, nella pratica, che ogni membro della comunità lo comprenda nella sua interezza. Richiede qualcosa di più complesso: una rete di verifiche parziali sovrapposte, sufficientemente densa che eventuali errori abbiano alta probabilità di essere rilevati.

Il modello della «prova sociale distribuita». Fallis (1997) ha analizzato la struttura epistemica dell'accettazione matematica in termini di affidabilità: una prova è accettata come corretta quando la

probabilità di errore non rilevato scende sotto una soglia accettabile per la comunità. Questa probabilità dipende da: il numero di revisori indipendenti, la loro expertise nel dominio specifico della prova, la presenza di verifiche computazionali parziali, la coerenza del risultato con strutture matematiche note. Per prove molto lunghe, nessuno dei revisori individuale verifica l'intera prova, ma la sovrapposizione delle verifiche parziali raggiunge la stessa affidabilità complessiva.

Questa struttura epistemica ha caratteristiche che divergono dal modello ideale della dimostrazione come argomento intellegibile nella sua totalità. In particolare:

1. **L'accettazione è graduabile**: una prova di 10 pagine verificata da 50 revisori indipendenti ha uno statuto epistemico diverso da una prova di 15.000 pagine verificata parzialmente da 500 specialisti — ma entrambe sono «dimostrate» nel senso operativo della matematica contemporanea.
2. **L'intuizione è parziale**: nessun matematico ha un'intuizione sull'*intera* struttura della classificazione dei gruppi finiti semplici; la comprensione è necessariamente frammentata nelle sottostrutture che ciascun esperto conosce.
3. **L'errore è possibile**: la storia matematica registra errori in prove «accettate» che vengono rilevati anni dopo — la «prova» della classificazione stessa ha richiesto riparazioni significative dopo la dichiarazione di completezza del 1983.

T.3 — Proof assistant e la nuova epistemologia della verifica

L'arrivo dei **proof assistant** — sistemi di verifica formale come Coq, Lean, Isabelle/HOL — ha trasformato radicalmente le possibilità dell'epistemologia matematica, e la direzione di questa trasformazione è rilevante per i temi del Blocco IV.

Formalizzazione delle prove classiche. Il progetto **Flyspeck** (Harrison, 2006–2014) ha prodotto una formalizzazione completa in HOL Light della dimostrazione di Hales del **teorema di Kepler** — che l'impacchettamento sferico più efficiente è quello dello strato

cubico centrato sulle facce, con densità $\pi/\left(3\sqrt{2}\right) \approx 0.7405$ — una prova che nella sua forma originale (Hales, 1998) era così complessa da non poter essere verificata dai revisori di *Annals of Mathematics* in tempi ragionevoli. La formalizzazione in HOL Light ha richiesto otto anni e ha prodotto una dimostrazione meccanicamente verificabile in ogni suo passo.

Cosa la formalizzazione aggiunge e cosa non aggiunge. La formalizzazione di Flyspeck garantisce la **correttezza logica** della prova con un grado di certezza che nessuna verifica umana può eguagliare: ogni passo è verificato da un kernel di tipo teorico la cui correttezza può essere verificata indipendentemente. Ma non aumenta la **comprensione** della prova: la versione formalizzata è ancora meno leggibile di quella di Hales, e l'intuizione sul *perché* l'impacchettamento fcc sia ottimale — la struttura geometrica sottostante — non è più accessibile attraverso la formalizzazione che attraverso la prova originale.

Il teorema di Gonthier sulla classificazione dei gruppi semplici — la formalizzazione del teorema di Feit-Thompson (che ogni gruppo finito di ordine dispari è risolubile) in Coq (2012) — rappresenta lo stato dell'arte attuale: 170.000 righe di Coq, sei anni di lavoro di una squadra di matematici, una prova le cui dimensioni eccedono quelle originali di Feit e Thompson del 1963 anche in forma formalizzata. La correttezza è verificata meccanicamente; la comprensione umana della struttura è aumentata rispetto alla situazione pre-Coq (il lavoro di formalizzazione ha prodotto semplificazioni e ristrutturazioni concettuali), ma non è piena nel senso di «seguibile da un singolo matematico».

T.4 — Il paradosso della comprensione post-formale

Le prove lunghe e i proof assistant rivelano un paradosso epistemologico che l'analisi della monografia può ora precisare. La comprensione di una prova matematica si è sempre intesa come qualcosa che un agente può avere: il matematico capisce la dimostrazione del teorema fondamentale dell'algebra, la porta nella mente come una struttura coerente. Con le prove lunghe, questo

ideale non è più raggiungibile nemmeno in linea di principio. Con la formalizzazione in proof assistant, la verifica è più affidabile che mai — ma la comprensione è, se possibile, ancora più lontana.

Questo paradosso non è una patologia da correggere: è la manifestazione della struttura profonda della matematica che il teorema di Gödel ha reso precisa. La comprensione matematica ha sempre ecceduto la derivazione formale nei due sensi: verso il basso (l'intuizione precede la dimostrazione) e verso l'alto (le dimostrazioni eccedono la comprensione individuale nella loro complessità). La comprensione matematica — intesa come visione di struttura nella terminologia di questa monografia — è sempre parziale: è la visione della struttura che si riesce a tenere in mente, non la visione della totalità dell'argomento.

Le prove lunghe e i proof assistant non hanno creato questa parzialità: l'hanno resa visibile. E la visibilità della parzialità è, in questo caso, un progresso epistemologico: la comunità matematica ha sviluppato pratiche sofisticate per gestire la comprensione distribuita e la verifica parziale che prima rimanevano implicite e non tematizzate.

Riferimenti per l'Appendice T: Appel e Haken (1977), «Every Planar Map Is Four Colorable», *Illinois Journal of Mathematics* 21, 429; Tymoczko (1979), «The Four-Color Problem and Its Philosophical Significance», *Journal of Philosophy* 76, 57; Fallis (1997), «The Epistemic Status of Probabilistic Proof», *Journal of Philosophy* 94, 165; Harrison (2008), «Formal Proof — Theory and Practice», *Notices of the AMS* 55, 1395; Gonthier et al. (2013), «A Machine-Checked Proof of the Odd Order Theorem», in *Interactive Theorem Proving*, Springer; Hales (2005), «A Proof of the Kepler Conjecture», *Annals of Mathematics* 162, 1065; Gorenstein (1983), «The Classification of Finite Simple Groups», *Bulletin of the AMS* 1; Dieudonné (1982), «The Work of Nicholas Bourbaki», *American Mathematical Monthly* 77, 134.

Appendice U — Complessità computazionale e limiti della predicibilità fisica

Questa appendice mappa la struttura della complessità computazionale rilevante per i limiti fisici della predicibilità e per la caratterizzazione delle capacità dei sistemi artificiali in fisica. Il punto di connessione con la monografia è duplice: da un lato, la complessità computazionale fornisce un linguaggio preciso per dire cosa i sistemi artificiali *possono* fare in linea di principio (entro la P/NP-gerarchia); dall'altro, mostra che molti problemi fisici di interesse fondamentale si collocano in classi di complessità che rendono la loro soluzione intractable anche per i migliori algoritmi disponibili.

U.1 — La gerarchia P/NP e la fisica computazionale

Classi di complessità fondamentali. Un problema decisionale è in **P** se esiste un algoritmo che lo risolve in tempo polinomiale nella dimensione dell'input. Un problema è in **NP** (Non-deterministic Polynomial) se una soluzione proposta può essere *verificata* in tempo polinomiale. La questione se P = NP — se la capacità di verificare una soluzione implichi la capacità di trovarla efficientemente — è il problema aperto più importante della matematica computazionale. La congettura P ≠ NP è universalmente accettata ma non dimostrata.

Un problema è **NP-completo** se è in NP e ogni problema in NP si riduce ad esso in tempo polinomiale: è tra i problemi più difficili di NP. Un problema è **NP-hard** se ogni problema in NP si riduce ad esso, anche se il problema stesso può non essere in NP.

Problemi fisici NP-hard. Molti problemi di interesse fisico fondamentale si collocano nelle classi più difficili della gerarchia computazionale:

- Il problema del **ground state** di un sistema di spin con interazioni frustrate (modello di Ising in 3D con accoppiamenti arbitrari) è NP-hard. Trovare la configurazione di spin a energia minima su un reticolo tridimensionale arbitrario è computazionalmente equivalente ai problemi

NP-hard più difficili. Questo non significa che il problema fisico sia impossibile da risolvere — significa che non esiste un algoritmo generale efficiente, e che per specifiche geometrie di reticolo la struttura del problema può renderlo più trattabile.

- Il problema della **piegatura proteica** — trovare la struttura tridimensionale di minima energia di una proteina data la sua sequenza di amminoacidi — è NP-hard per i modelli su reticolo (Hart e Istrail, 1997). Questa classificazione di complessità teorica non contraddice il successo pratico di AlphaFold2 (discusso nel Blocco V): AlphaFold2 non risolve il problema di piegatura nella sua generalità, ma sfrutta regolarità evolutive nelle proteine biologiche che non caratterizzano l'insieme generale dei problemi di piegatura. Biologicamente rilevante ≠ computazionalmente generale.
- I problemi di **ottimizzazione combinatoria** che emergono nella progettazione di circuiti quantistici — trovare la decomposizione ottimale di un gate unitario in una base di gate universali — appartengono a classi di complessità che eccedono P, e per alcune istanze sono NP-hard.

U.2 — Complessità quantistica: la gerarchia BQP e oltre

L'avvento del calcolo quantistico ha introdotto una nuova classe di complessità rilevante per la fisica: **BQP** (Bounded-error Quantum Polynomial time), la classe dei problemi risolvibili da un calcolatore quantistico in tempo polinomiale con probabilità di errore al più $\frac{1}{3}$.

P ⊆ BQP, ma P ≠ BQP. L'algoritmo di Shor (1994) per la fattorizzazione in fattori primi è in BQP ma si ritiene (con alta confidenza, benchè non dimostrato) non essere in P. Questo significa che un calcolatore quantistico può fattorizzare interi di 2000 bit in tempo polinomiale — rompendo la crittografia RSA — mentre il miglior algoritmo classico noto (il campo dei crivelli numerici) richiede tempo esponenziale.

La relazione BQP/NP. Non si sa se BQP ⊆ NP. Il problema della simulazione quantistica — simulare l'evoluzione di un sistema a n

qubit su un calcolatore classico — richiede in generale risorse esponenziali in n (il problema dello spazio di Hilbert di dimensione 2^n). Questo costituisce l'argomento principale per la superiorità computazionale del calcolo quantistico sulle simulazioni classiche di sistemi quantistici. Ma la simulazione di sistemi fisici specifici (non generici) può cadere in classi più basse se la struttura fisica del sistema impone vincoli che riducono lo spazio di configurazioni effettive.

QMA e la verifica quantistica. La classe **QMA** (Quantum Merlin-Arthur) — l'analogo quantistico di NP — caratterizza i problemi per cui una soluzione quantistica proposta può essere verificata efficientemente da un verificatore quantistico. Kitaev (2002) ha mostrato che il problema del **ground state locale** — determinare se l'energia del ground state di un Hamiltoniano k-locale su n qubit è al di sopra o al di sotto di una soglia data — è QMA-completo. Questo è il risultato di complessità più rilevante per la chimica quantistica computazionale: il problema di trovare l'energia del ground state di una molecola è QMA-completo nel caso generale, il che suggerisce che nessun algoritmo quantistico (né classico) può risolverlo efficientemente per molecole arbitrarie.

U.3 — Caos, predizione e complessità nella fisica classica

La complessità computazionale nel senso tecnico (P/NP) non è l'unica forma di complessità rilevante per i limiti fisici della predicibilità. I sistemi classici caotici pongono limiti alla predicibilità che non derivano dalla complessità algoritmica ma dalla sensibilità alle condizioni iniziali.

Esponente di Lyapunov e orizzonte di predicibilità. Per un sistema dinamico caotico, la separazione tra due traiettorie vicine cresce esponenzialmente: $\delta(t) \sim \delta(0) e^{\lambda t}$, dove $\lambda > 0$ è il **massimo esponente di Lyapunov**. Se la precisione iniziale è $\delta(0)$ e si vuole predire con precisione Δ, l'**orizzonte di predicibilità** è:

$$T_{pred} \approx \frac{1}{\lambda} ln \frac{\Delta}{\delta(0)}.$$

Per l'atmosfera terrestre, $\lambda^{-1} \approx 5$ giorni (il tempo di Lyapunov atmosferico). Con misure meteorologiche a precisione $\delta(0)/\Delta \approx 10^6$, l'orizzonte di predicibilità è $T_{pred} \approx 5 \times ln\left(10^6\right) \approx 70$ giorni — il limite fondamentale della previsione meteorologica che rende le previsioni a due settimane strutturalmente inaffidabili, indipendentemente dalla potenza computazionale disponibile.

Questo limite non è una limitazione degli algoritmi: è una proprietà fisica del sistema. Raddoppiare la potenza computazionale estende l'orizzonte di predicibilità di soli $ln2/\lambda \approx 3.5$ giorni. L'investimento computazionale marginalmente aggiuntivo produce ritorni logaritmicamente decrescenti sulla predicibilità.

Il teorema di Rice e i sistemi fisici indecidibili. Il **teorema di Rice** (1953) afferma che qualsiasi proprietà non banale dei programmi (delle funzioni che calcolano) è indecidibile: non esiste un algoritmo che determini, per un programma arbitrario, se calcola una funzione con quella proprietà. Applicato alla fisica computazionale, questo significa che qualsiasi proprietà non banale del comportamento a lungo termine di un sistema fisico simulato — convergenza, periodicità, raggiungimento di un attractor specifico — è in generale indecidibile. Wolfram (2002) ha sviluppato questa connessione nella nozione di **irriducibilità computazionale**: per molti sistemi fisici, il modo più efficiente per conoscerne il comportamento è eseguire la simulazione passo per passo, senza scorciatoie algoritmiche.

U.4 — Implicazioni per i sistemi artificiali in fisica

La struttura della complessità computazionale ha due implicazioni opposte per le capacità dei sistemi artificiali in fisica.

Dove i sistemi artificiali sono più potenti. Per problemi fisici in P — simulazioni di sistemi con geometria favorevole, ottimizzazione di parametri in regimi regolari, interpolazione in spazi di soluzioni note — i sistemi artificiali possono superare i fisici umani di ordini di grandezza. L'apprendimento automatico applicato alla fisica sfrutta strutture regolari che umani non noterebbero sistematicamente, e

opera su dimensioni di dati che eccedono la capacità di elaborazione umana.

Dove la complessità pone limiti invarianti. Per problemi fisici NP-hard, QMA-completi, o intractable per sensibilità caotica alle condizioni iniziali, i sistemi artificiali non possono fare meglio degli algoritmi classici ottimali — che sono già insufficienti. AlphaFold2 non risolve la piegatura proteica nel caso generale: sfrutta correlazioni evolutive che rendono lo spazio di ricerca biologicamente rilevante molto più piccolo di quello matematicamente possibile. Questa distinzione — tra la soluzione efficiente di istanze strutturalmente regolari e la soluzione del problema generale — è cruciale per valutare le capacità fisiche dei sistemi artificiali: le prestazioni impressionanti sono quasi sempre sfruttamento di struttura, non vittoria sulla complessità generale.

La complessità computazionale fornisce quindi un linguaggio preciso per la distinzione che la monografia articola qualitativamente: i sistemi artificiali amplificano la capacità di sfruttare struttura nota; non cambiano i limiti fondamentali della predicibilità e della calcolabilità che la struttura della fisica impone.

Riferimenti per l'Appendice U: Garey e Johnson (1979), *Computers and Intractability*, Freeman; Kitaev (2002), in *Proceedings of the 3rd ACM STOC*, ACM; Hart e Istrail (1997), «Fast Protein Folding in the Hydrophobic-Hydrophilic Model», *Journal of the ACM* 44, 671; Shor (1994), «Polynomial-Time Algorithms for Prime Factorization», *SIAM Journal on Computing* 26, 1484; Wolf (2006), «Quantum Phase Transitions in Transverse Field Ising Models», *Physical Review Letters* 96; Lorenz (1963), «Deterministic Nonperiodic Flow», *Journal of the Atmospheric Sciences* 20, 130; Wolfram (2002), *A New Kind of Science*, Wolfram Media; Rice (1953), «Classes of Recursively Enumerable Sets and Their Decision Problems», *Transactions of the AMS* 74, 358; Bernstein e Vazirani (1997), «Quantum Complexity Theory», *SIAM Journal on Computing* 26, 1411.

Appendice V — Struttura matematica della meccanica quantistica geometrica: fibrati, connessioni e invarianti

Questa appendice raccoglie gli strumenti della **geometria differenziale** necessari per comprendere pienamente la fase di Berry (§1.10) e il ruolo degli invarianti topologici nella fisica della materia condensata. L'obiettivo è fornire la struttura matematica minimale che rende intelligibile perché la fase di Berry è un oggetto geometrico — non un oggetto analitico — e perché gli invarianti topologici sono interi.

V.1 — Fibrati vettoriali e fibrati principali

Un **fibrato vettoriale** su una base B è uno spazio E dotato di una proiezione $\pi: E \to B$ tale che la **fibra** $\pi^{-1}(b)$ su ogni punto $b \in B$ è uno spazio vettoriale V, e la struttura locale è quella del prodotto $U \times V$ per aperti $U \subseteq B$.

Il caso fisicamente rilevante per la fase di Berry è il **fibrato di linea complesso** $L \to M$ su una varietà di parametri M: la fibra su ogni punto $\lambda \in M$ è la copia dell'autostato $|n(\lambda)\rangle$ — un raggio nello spazio di Hilbert H, che è isomorfo a C.

Un **fibrato principale** $P \to B$ con gruppo di struttura G è uno spazio su cui G agisce a destra fiberwise, con fibre isomorfe a G come G-spazi. Per il fibrato di linea complesso, $G = U(1)$ — il gruppo delle fasi $e^{i\chi}$ — e l'azione è la ridefinizione di fase degli autostati: $|n(\lambda)\rangle \to e^{i\chi(\lambda)}|n(\lambda)\rangle$.

La struttura del fibrato formalizza precisamente l'ambiguità di fase degli autostati quantistici: non esiste una scelta «canonica» di fase per $|n(\lambda)\rangle$ su tutto lo spazio dei parametri (a meno che il fibrato sia **banale** — globalmente isomorfo al prodotto $M \times C$). L'ostruzione alla banalizzazione è misurata dagli invarianti topologici.

V.2 — Connessioni e curvatura

Una **connessione** su un fibrato principale $P \to B$ è una distribuzione orizzontale $H \subset TP$ che è equivariante rispetto all'azione del gruppo G:

fornisce un modo di «trasportare» elementi della fibra lungo curve in B senza ruotarli «inutilmente».

Per il fibrato di linea complesso degli autostati, la connessione è la **connessione di Berry**: in un gauge locale (una sezione $|n(\lambda)\rangle$ dell'autostato), la forma di connessione è la **1-forma di Berry**:

$$A_n = i\langle n(\lambda)|d|n(\lambda)\rangle,$$

dove d è il differenziale esterno rispetto a λ. Questa è una 1-forma a valori reali su M (poiché $\langle n|n\rangle = 1$ implica che $i\langle n|dn\rangle$ è reale). Sotto cambio di gauge $|n\rangle \to e^{i\chi}|n\rangle$, si ha $A_n \to A_n - d\chi$ — la trasformazione di gauge di un potenziale di Yang-Mills abeliano.

La **curvatura** della connessione è la **2-forma di Berry**:

$$F_n = dA_n.$$

Per la forma esplicita in coordinate (λ_μ):

$$F_{n,\mu\nu} = \partial_{\lambda_\mu} A_{n,\nu} - \partial_{\lambda_\nu} A_{n,\mu} = -\,2\,Im\langle \partial_\mu n|\partial_\nu n\rangle.$$

La curvatura è **invariante di gauge** — a differenza della connessione, non cambia sotto ridefinizione di fase degli autostati. È l'analogo del tensore del campo elettromagnetico $F_{\mu\nu}$ per la connessione di Berry.

La fase di Berry per un percorso chiuso C è:

$$\gamma_n(C) = \oint_C A_n = \iint_\Sigma F_n,$$

dove la seconda uguaglianza segue dal teorema di Stokes (con Σ una superficie con bordo C). Questo integrale è topologicamente robusto: dipende solo dalla classe di omotopia del percorso C, non dalla sua forma specifica.

V.3 — Classi caratteristiche e il numero di Chern

Le **classi caratteristiche** sono classi di coomologia che misurano l'ostruzione topologica alla banalizzazione di un fibrato. Per fibrati di linea complessi, la classe caratteristica fondamentale è la **prima classe di Chern** $c_1(L) \in H^2(M, Z)$.

Concretamente, la prima classe di Chern è rappresentata dalla 2-forma di curvatura normalizzata:

$$c_1(L) = \frac{1}{2\pi}\left[F_n\right] \in H^2(M, Z),$$

dove $\left[F_n\right]$ è la classe di coomologia di de Rham della 2-forma di Berry. Il fatto che questa classe sia intera — che il suo integrale su qualsiasi 2-ciclo chiuso sia un intero — è il **teorema di Chern-Weil** e corrisponde alla **condizione di quantizzazione di Dirac** per i monopoli magnetici.

Per la zona di Brillouin di un cristallo bidimensionale — che ha la topologia del toro T^2 — il **numero di Chern** della n-esima banda è:

$$C_n = \frac{1}{2\pi}\iint_{T^2} F_n,$$

e questo è necessariamente un intero per le ragioni topologiche descritte sopra. La **conduttanza di Hall quantistica** è:

$$\sigma_{xy} = \frac{e^2}{h}\sum_{n\,occ.} C_n,$$

dove la somma è sulle bande occupate. L'intera-zione di questo risultato — derivato da Thouless, Kohmoto, Nightingale e den Nijs nel 1982 — è la manifestazione fisica della topologia del fibrato degli autostati.

V.4 — K-teoria e la classificazione completa

La classificazione completa dei **isolanti topologici** e **superconduttori topologici** richiede strumenti matematici più avanzati dei soli numeri di Chern: la **K-teoria topologica**, che classifica i fibrati vettoriali stabili su spazi topologici.

La classificazione «tenfold way» di Altland e Zirnbauer (1997) e Kitaev (2009) organizza tutti i Hamiltoniani di banda non interagenti in dieci classi di simmetria — determinate dalla presenza o assenza di simmetrie di inversione temporale, particella-buca, e chiralità — e identifica per ciascuna classe e per ciascuna dimensione spaziale il gruppo degli invarianti topologici possibili. Il risultato è una tabella periodica degli isolanti topologici:

Classe	TRS	PHS	Chiral			
A (unitaria)	0	0	0	0		0
AIII (chirale unit.)	0	0	1		0	
AI		0	0	0	0	0
BDI			1		0	0
D	0		0			0
…	…	…	…	…	…	…

dove Z indica un invariante intero (come il numero di Chern), Z_2 un invariante binario (come l'invariante di Kane-Mele degli isolanti topologici tridimensionali), e 0 indica topologia banale.

La classificazione è un risultato della K-teoria: i gruppi Z e Z_2 sono i gruppi di K-teoria di certi spazi classificanti. Questa struttura matematica — la K-teoria come strumento per classificare le fasi topologiche della materia — è l'esempio più avanzato di comprensione strutturale nel senso del §1.10.5: permette di *prevedere* quali materiali con quali simmetrie possono avere fasi topologicamente non banali, senza calcolare l'invariante caso per caso.

Riferimenti per l'Appendice V: Nakahara (2003), *Geometry, Topology and Physics*, Taylor & Francis; Milnor e Stasheff (1974), *Characteristic Classes*, Princeton; Thouless et al. (1982), «Quantized Hall Conductance in a Two-Dimensional Periodic Potential», *Physical Review Letters* 49, 405; Altland e Zirnbauer (1997), «Nonstandard Symmetry Classes in Mesoscopic Normal-Superconducting Hybrid Structures», *Physical Review B* 55, 1142; Kitaev (2009), «Periodic Table for Topological Insulators and Superconductors», *AIP Conference Proceedings* 1134, 22; Hasan e Kane (2010), «Colloquium: Topological

Insulators», *Reviews of Modern Physics* 82, 3045; Atiyah e Singer (1963), «The Index of Elliptic Operators», *Annals of Mathematics* 87, 484.

Appendice W — Dalla comprensione alla spiegazione: struttura dell'argomentazione scientifica in fisica

Questa appendice analizza la struttura dell'**argomentazione scientifica** in fisica — la forma che le spiegazioni fisiche devono avere per essere accettate dalla comunità — come complemento agli argomenti sulla comprensione individuale sviluppati nei Blocchi II e VI. La distinzione tra comprensione come stato cognitivo del fisico e spiegazione come atto comunicativo indirizzato alla comunità è cruciale per valutare cosa i sistemi artificiali possono e non possono fare in fisica.

W.1 — Modelli di spiegazione scientifica e la fisica

La filosofia della scienza ha proposto diversi modelli della struttura logica della spiegazione scientifica. Il modello **nomologico-deduttivo** di Hempel e Oppenheim (1948) sostiene che spiegare un evento E è derivarlo deducibilmente da leggi generali $L_1, \ldots, L_n$ e condizioni iniziali $C_1, \ldots, C_k$:

$$\frac{L_1, \ldots, L_n \quad C_1, \ldots, C_k}{E}$$

Il modello ha un'applicabilità limitata in fisica: molte spiegazioni fisiche non hanno questa struttura deduttiva, ma piuttosto la struttura di una **riduzione a meccanismo** (il calore è energia cinetica molecolare) o di una **unificazione** (la caduta delle mele e il moto dei pianeti sono istanze della stessa legge gravitazionale).

Friedman (1974) e Kitcher (1981) hanno sviluppato il modello dell'**unificazione**: una spiegazione scientifica riduce il numero di fatti che devono essere assunti come primitivi, mostrando che fenomeni apparentemente diversi sono istanze dello stesso schema esplicativo. La fisica teorica ha fatto della unificazione il suo programma fondamentale: la meccanica classica unifica la cinematica terrestre e

celeste; l'elettrodinamica unifica elettricità, magnetismo e ottica; il modello standard unifica le forze elettroweak e forte.

Il ruolo dell'analogia. Harman (1965) e Hesse (1966) hanno sottolineato il ruolo delle **analogie** nella generazione e accettazione di spiegazioni fisiche: Maxwell ha sviluppato la teoria del campo elettromagnetico per analogia con la meccanica dei fluidi; il modello degli orbitali atomici è un'analogia con le orbite planetarie; i monopoli magnetici di Dirac sono stati introdotti per analogia con le cariche elettriche. L'analogia non è un ornamento pedagogico: è una struttura cognitiva che permette di trasferire comprensione da un dominio a un altro, e che costituisce una parte significativa dell'argomentazione fisica accettata come spiegazione.

W.2 — La struttura della spiegazione in meccanica quantistica

La meccanica quantistica pone sfide specifiche ai modelli standard di spiegazione scientifica. Il modello nomologico-deduttivo si applica senza difficoltà: le previsioni quantistiche sono derivabili deterministicamente dall'equazione di Schrödinger dato lo stato iniziale. Ma la **spiegazione** dei risultati di misura individuali — perché *questa* misurazione ha prodotto *questo* risultato — non è disponibile nella meccanica quantistica standard: la teoria prevede le probabilità dei risultati, non i risultati stessi.

Questa limitazione non è epistemica ma strutturale (nell'interpretazione di Copenaghen e nella maggior parte delle interpretazioni): non esiste una spiegazione causale del singolo evento di misura nel linguaggio della meccanica quantistica. La meccanica quantistica spiega le distribuzioni, non i singoli eventi. Questa è una forma di spiegazione qualitativamente diversa da quella della meccanica classica, e la sua accettazione da parte della comunità fisica — dopo decenni di dibattito (il dibattito Einstein-Bohr è il documento storico di questa transizione) — richiese una ristrutturazione del concetto di spiegazione fisica accettabile.

Spiegazione per struttura invariante. La fisica moderna ha sviluppato una forma di spiegazione che non ha analogo nel modello

nomologico-deduttivo: la **spiegazione per struttura invariante**. Un fenomeno è spiegato quando si identifica la struttura topologica o algebrica che lo rende necessario. La quantizzazione della conduttanza di Hall in multipli interi di e^2/h è «spiegata» dal fatto che il numero di Chern è necessariamente intero — e questa spiegazione è soddisfacente per la comunità non perché deriva il fenomeno da leggi più fondamentali, ma perché lo riconduce a una struttura geometrica che si capisce indipendentemente. Questo tipo di spiegazione — per struttura invariante, o per necessità topologica — è la forma più avanzata della spiegazione fisica contemporanea, e richiede la comprensione strutturale nel senso del §1.10.5.

W.3 — Cosa i sistemi artificiali possono spiegare

La distinzione tra i diversi modelli di spiegazione scientifica permette di precisare le capacità e i limiti dei sistemi artificiali come generatori di spiegazioni fisiche.

I sistemi artificiali possono generare spiegazioni di tipo **nomologico-deduttivo** con efficienza superiore agli umani: derivare da leggi fisiche date le conseguenze per condizioni iniziali specifiche, identificare quali leggi sono pertinenti per un fenomeno dato, produrre catene di ragionamento formalmente corrette. Questa capacità è amplificata nei sistemi che combinano ragionamento simbolico e calcolo numerico.

I sistemi artificiali non generano spiegazioni di tipo **unificazione** in senso creativo: non identificano che due fenomeni apparentemente diversi sono istanze dello stesso schema esplicativo quando questo schema non è rappresentato nel corpus di addestramento. L'unificazione creativa richiede la capacità di vedere strutture trasversali a domini distinti — la stessa capacità che richiede la comprensione strutturale nel senso del Blocco I — e questa capacità non emerge dall'elaborazione statistica di testi.

I sistemi artificiali non generano spiegazioni **per struttura invariante** nel senso autentico: non identificano nuovi invarianti topologici che spiegano fenomeni fisici osservati, non riconoscono che una struttura geometrica specifica è responsabile di un fenomeno osservato

quando questa connessione non era già esplicitamente presente nel corpus di addestramento. Questa limitazione non è contingente ma strutturale: richiede la comprensione del fibrato degli autostati come oggetto geometrico globale, che non è estraibile da correlazioni locali in nessun insieme di dati.

La distinzione cognitiva tra comprensione e spiegazione, elaborata in questa appendice nella sua dimensione comunitaria e epistemologica, converge quindi con la distinzione tra comprensione individuale e prestazione predittiva che la monografia articola come tesi centrale: i sistemi artificiali producono spiegazioni locali e derivazioni formali con alta efficienza, ma non generano le strutture esplicative globali — unificazione, riduzione topologica, analogia strutturale — che costituiscono il progresso esplicativo nella fisica come scienza.

Riferimenti per l'Appendice W: Hempel e Oppenheim (1948), «Studies in the Logic of Explanation», *Philosophy of Science* 15, 135; Friedman (1974), «Explanation and Scientific Understanding», *Journal of Philosophy* 71, 5; Kitcher (1981), «Explanatory Unification», *Philosophy of Science* 48, 507; Hesse (1966), *Models and Analogies in Science*, Notre Dame; Harman (1965), «The Inference to the Best Explanation», *Philosophical Review* 74, 88; van Fraassen (1980), *The Scientific Image*, Oxford; Woodward (2003), *Making Things Happen: A Theory of Causal Explanation*, Oxford; Batterman (2002), *The Devil in the Details: Asymptotic Reasoning in Explanation, Reduction, and Emergence*, Oxford; Morrison (2000), *Unifying Scientific Theories*, Cambridge.

Appendice X — Strumenti metodologici per la ricerca sulla comprensione fisica: dall'osservazione all'esperimento

Questa appendice descrive i principali strumenti metodologici attraverso cui la ricerca empirica sulla comprensione fisica esperta ha

prodotto i dati che i Blocchi II, III e VI hanno discusso. L'obiettivo è duplice: fornire le basi per valutare criticamente la solidità delle evidenze usate nella monografia, e indicare le direzioni metodologiche attraverso cui le domande aperte potrebbero essere investigate empiricamente.

App.X.1 — Il problema metodologico della comprensione fisica

Misurare la comprensione fisica è metodologicamente più difficile che misurare la prestazione fisica. La prestazione — la capacità di risolvere problemi fisici in un tempo dato — è direttamente osservabile e comparabile. La comprensione — la struttura cognitiva che orienta il riconoscimento di strutture fisiche, anticipa le soluzioni, valuta la plausibilità delle approssimazioni — è un costrutto cognitivo interno che si manifesta indirettamente.

Il rischio del confondimento. Il rischio principale nella ricerca sulla comprensione fisica è confondere comprensione con prestazione: inferire la struttura cognitiva di un agente dalla sua capacità di produrre output corretti. Questo errore sistematico è documentato nella storia della ricerca: studenti che risolvono correttamente problemi di meccanica attraverso manipolazione algoritmica di formule senza la comprensione concettuale corrispondente (i «problem-solvers algoritmici» di Trowbridge e McDermott, 1980) mostrano prestazioni elevate nei test standard ma fallimenti caratteristici nei problemi che richiedono applicazione in contesti nuovi.

La soluzione metodologica a questo problema richiede strumenti che distinguano comprensione da performance: test di trasferimento (applicazione in contesti nuovi), analisi del processo di soluzione (non solo del risultato), elicitazione diretta delle rappresentazioni cognitive attraverso think-aloud protocols e interviste strutturate.

App.X.2 — Strumenti di misura concettuale: inventari e test di trasferimento

Il Force Concept Inventory (FCI). L'FCI (Hestenes, Wells e Swackhamer, 1992) è il test di comprensione concettuale più usato nella ricerca sulla fisica educativa. Consiste di 30 domande a scelta multipla che riguardano concetti fondamentali della meccanica newtoniana (forza, movimento, gravità, interazione) e sono progettate in modo che le risposte sbagliate corrispondano a concezioni alternative specifiche e documentate — i «frame alternativi» che la ricerca fenomenografica ha identificato come persistenti anche dopo l'insegnamento formale.

La struttura dell'FCI permette di distinguere comprensione concettuale da abilità algoritmica: un studente che ha imparato a risolvere problemi di meccanica tramite le equazioni cinematiche può avere prestazioni eccellenti nei compiti di calcolo ma punteggi bassi nell'FCI se non ha ristrutturato le proprie rappresentazioni concettuali della forza e del movimento. La correlazione tra punteggi FCI e prestazioni su problemi algoritmici è moderata nei novizi e alta negli esperti — coerentemente con la struttura cognitiva dell'expertise descritta nel §2.9: nell'esperto, comprensione concettuale e capacità di calcolo sono integrate; nel novizio, possono essere dissociate.

Test di trasferimento strutturale. I test di trasferimento strutturale — proposti da Novick e Holyoak (1991) nel contesto della ricerca sul ragionamento analogico — misurano la capacità di applicare una struttura di soluzione a un problema superficialmente diverso ma strutturalmente isomorfo. In fisica, questi test sono particolarmente rivelatori: un novizio risolve problemi fisici riconoscendo la superficie (la presenza di molle, di cariche, di gas) e ricordando le formule associate; un esperto riconosce la struttura (un problema di conservazione, un problema di simmetria, un problema di approssimazione adiabatica) e applica la struttura indipendentemente dalla superficie.

La ricerca di Chi, Feltovich e Glaser (1981) ha usato esattamente questo paradigma per documentare la differenza esperto-novizio nella categorizzazione dei problemi di meccanica: novizi raggruppano i problemi per caratteristiche superficiali (tutti i

problemi con rampe inclined, tutti i problemi con blocchi su superfici); esperti raggruppano per struttura fisica sottostante (tutti i problemi di conservazione dell'energia, tutti i problemi in cui il principio di Newton si applica a sistemi in equilibrio). Questa differenza di categorizzazione è una delle evidenze più dirette della struttura cognitiva dell'expertise fisica descritta nel §2.9.

App.X.3 — Analisi del processo: think-aloud e protocolli verbali

Il metodo del think-aloud. Il metodo del think-aloud (Ericsson e Simon, 1984) chiede ai soggetti di verbalizzare il proprio processo di pensiero mentre risolvono un problema, senza interpretare o spiegare retrospettivamente. La verbalizzazione concorrente è distinta dall'auto-osservazione retrospettiva: il soggetto descrive ciò che fa mentre lo fa, producendo un protocollo verbale che può essere analizzato per identificare le strategie di soluzione, le rappresentazioni usate, i momenti di impasse e di insight.

Larkin e collaboratori (1980) hanno usato think-aloud protocols per confrontare i processi di soluzione di esperti e novizi in problemi di meccanica classica. I risultati mostrano la struttura descritta nel §2.9: gli esperti iniziano con un'analisi qualitativa della struttura fisica del problema (identificazione delle forze, delle leggi di conservazione applicabili, delle simmetrie), poi traducono questa struttura in equazioni; i novizi iniziano direttamente con le equazioni, spesso senza un'analisi fisica preliminare. Questa differenza di ordine — struttura fisica prima delle equazioni vs. equazioni prima della struttura fisica — è una manifestazione diretta della comprensione anticipatrice discussa nel §2.14.1.

Protocolli di intervista clinica. L'intervista clinica di stampo piagetiano — una conversazione semistrutturata in cui l'intervistatore segue le risposte del soggetto con domande di chiarimento e di sondaggio — permette di accedere a strutture cognitive che i test a risposta chiusa non catturano. Hammer (1994) ha usato interviste cliniche con studenti di fisica per documentare le loro **epistemologie implicite** — le loro credenze sulla natura della

conoscenza fisica, su cosa significhi «capire» la fisica, su che tipo di oggetti siano le leggi fisiche. Queste epistemologie implicite, mostrate coerenti e resistenti all'insegnamento convenzionale, hanno effetti documentati sulle strategie di apprendimento e sulle prestazioni.

App.X.4 — Neuroimmagine e misure fisiologiche

fMRI nella ricerca educativa. L'uso della risonanza magnetica funzionale nella ricerca sull'apprendimento fisico ha prodotto i risultati discussi nell'Appendice AC, ma ha anche rivelazioni più dirette sulla struttura cognitiva del ragionamento fisico in tempo reale. Koedinger et al. (2012) e Mason e Just (2016) hanno usato fMRI per monitorare l'attivazione cerebrale mentre studenti di fisica risolvono problemi di meccanica a diversi livelli di expertise.

Il risultato più rilevante per la monografia è la **transizione di attivazione** nel corso dell'apprendimento: studenti in formazione che passano dalla fase di novizio alla fase intermedia mostrano una riduzione delle attivazioni nelle aree di elaborazione linguistica (dlPFC verbale) e un aumento nelle aree di integrazione spaziale (lobulo parietale inferiore). Questa transizione — dall'elaborazione delle formule come testo all'elaborazione delle strutture fisiche come oggetti spaziali — è la firma neurale della costruzione dei chunk cognitivi descritta nel §2.9.

Eye-tracking e analisi della distribuzione dell'attenzione. La registrazione dei movimenti oculari durante la lettura di problemi fisici e di diagrammi fisici è una metodologia non invasiva che rivela la distribuzione dell'attenzione senza richiedere verbalizzazione. Madsen et al. (2012) hanno mostrato che esperti e novizi guardano problemi fisici in modo fondamentalmente diverso: gli esperti fissano più a lungo le regioni del diagramma che contengono le informazioni strutturalmente rilevanti (i punti di applicazione delle forze, le giunture cinematiche) e trascorrono meno tempo nelle regioni superficialmente salienti ma fisicamente marginali; i novizi distribuiscono l'attenzione in modo più uniforme tra regioni rilevanti e irrilevanti.

Questo risultato è coerente con la struttura cognitiva dell'expertise descritta nel §2.9 — i chunk cognitivi guidano l'attenzione verso le strutture fisicamente rilevanti — e fornisce evidenza che la differenza non è solo nella conoscenza dichiarativa posseduta ma nel modo in cui quella conoscenza orienta la percezione del problema.

App.X.5 — La ricerca computazionale sulla comprensione

Modelli cognitivi computazionali. La psicologia cognitiva computazionale ha prodotto modelli del ragionamento fisico che forniscono previsioni testabili sulla struttura della comprensione. I modelli basati su **sistemi di produzione** (Anderson, 1983; VanLehn, 1987) rappresentano la conoscenza fisica come insieme di regole condizionali («se riconosci una forza netta diversa da zero, scrivi la seconda legge di Newton») e simulano il processo di soluzione come sequenza di applicazioni di regole.

Questi modelli catturano aspetti della prestazione algoritmica ma hanno difficoltà a modellare la comprensione strutturale anticipatrice: il riconoscimento del tipo di problema prima di iniziare la soluzione, la valutazione della plausibilità del risultato senza calcolo esplicito, la flessibilità che permette di adattare la strategia quando la strada iniziale non porta da nessuna parte. Queste difficoltà non sono limiti tecnici risolvibili con modelli più elaborati: riflettono il fatto che la comprensione anticipatrice richiede rappresentazioni che vanno oltre la struttura proposizionale delle regole di produzione.

Intelligent Tutoring Systems e la mappa dell'expertise. I sistemi di tutoraggio intelligente (Intelligent Tutoring Systems, ITS) per la fisica — come Andes (VanLehn et al., 2005) e Cognitive Tutor (Koedinger e Corbett, 2006) — sono stati costruiti su modelli cognitivi computazionali dell'expertise fisica e testati su grandi campioni di studenti. I risultati mostrano miglioramenti significativi nelle prestazioni algoritmiche e moderati nella comprensione concettuale misurata dall'FCI. La valutazione più importante di questi sistemi non è il miglioramento medio: è la *struttura* degli errori che i sistemi non riescono a correggere. Gli errori che persistono anche dopo

ampio uso degli ITS tendono a essere esattamente gli errori concettuali di struttura profonda — la confusione tra forza e velocità, la credenza nella «forza impressa» degli oggetti in movimento — che le metodologie orientate alla comprensione strutturale (Tutorials, peer instruction) correggono più efficacemente. Questa evidenza convergente suggerisce che le due componenti cognitive — comprensione strutturale e abilità procedurale — richiedono diversi tipi di intervento e diversi tipi di sistema di supporto.

App.X.6 — Limiti metodologici e direzioni future

La ricerca empirica sulla comprensione fisica ha prodotto evidenze solide sulla struttura cognitiva dell'expertise ma ha limiti metodologici significativi che vanno riconosciuti.

Il problema della generalizzazione. La maggior parte degli studi è condotta su studenti di fisica universitaria o su fisici accademici in contesti controllati di laboratorio. La generalizzabilità a fisici sperimentali che lavorano su apparati complessi, a fisici industriali che operano in contesti applicativi, o a fisici teorici che lavorano su problemi ai confini della conoscenza è limitata e richiede validazione indipendente.

Il problema dell'ecologia della ricerca. I problemi usati negli studi di laboratorio — problemi di meccanica classica da manuale, problemi di circuiti semplici, problemi di ottica geometrica — sono rappresentativi della fisica di insegnamento ma non della fisica di ricerca. La struttura cognitiva dell'expertise nella risoluzione di problemi noti è probabilmente diversa dalla struttura cognitiva dell'expertise nella generazione di ipotesi su problemi aperti, e la ricerca si è concentrata prevalentemente sulla prima.

Direzioni future. Le metodologie emergenti — neuroimmagine ad alta risoluzione temporale (MEG, ECoG), eye-tracking combinato con fMRI, analisi computazionale di testi scientifici come indicatori proxy della struttura cognitiva — aprono nuove possibilità per investigare le domande che la monografia lascia aperte: la struttura neurale della comprensione anticipatrice, la trasformazione dell'expertise fisica nell'era dei sistemi artificiali come strumenti computazionali ubiqui,

e la domanda fondamentale su cosa distingua un sistema che *usa* un modello fisico da un sistema che *abita* un modello fisico nel senso del §6.12.3.

Riferimenti per l'Appendice X: Trowbridge e McDermott (1980), «Investigation of Student Understanding of the Concept of Velocity», *American Journal of Physics* 48, 1020; Hestenes, Wells e Swackhamer (1992), «Force Concept Inventory», *Physics Teacher* 30, 141; Chi, Feltovich e Glaser (1981), «Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices», *Cognitive Science* 5, 121; Ericsson e Simon (1984), *Protocol Analysis*, MIT Press; Larkin et al. (1980), «Expert and Novice Performance in Solving Physics Problems», *Science* 208, 1335; Hammer (1994), «Epistemological Beliefs in Introductory Physics», *Cognition and Instruction* 12, 151; Madsen et al. (2012), «Differences in Visual Attention Between Those Who Correctly and Incorrectly Answer Physics Problems», *Physical Review Special Topics — Physics Education Research* 8; Mason e Just (2016), «Neural Representations of Physics Concepts», *Psychological Science* 27, 904; VanLehn et al. (2005), «The Andes Physics Tutoring System», *Journal of the Learning Sciences* 14, 209; Koedinger e Corbett (2006), «Cognitive Tutors: Technology Bringing Learning Sciences to the Classroom», in *The Cambridge Handbook of the Learning Sciences*.

Appendice Y — La lettura della natura in azione: dodici episodi dalla storia della fisica

Questa appendice raccoglie dodici episodi dalla storia della fisica in cui la struttura della lettura della natura — nella forma precisa sviluppata nel Blocco VI — è documentata in modo sufficientemente ricco da permettere un'analisi cognitiva dettagliata. Gli episodi non sono aneddoti: sono casi di test per la tesi. Ciascuno è scelto perché documenta una specifica componente della lettura della natura in un momento storico in cui quella componente era visibile con insolita chiarezza — nei documenti originali, nelle lettere, nelle testimonianze autobiografiche. Insieme, costruiscono una

fenomenologia della lettura della natura che nessun capitolo teorico potrebbe sostituire.

Y.1 — Maxwell e le linee di forza: la lettura come creazione di immagini fisiche

James Clerk Maxwell, nel 1855, era uno studente ventitreenne a Cambridge quando scrisse il suo primo paper elettromagnetico, *On Faraday's Lines of Force*. Il paper è straordinario non per i suoi risultati tecnici — è un'elaborazione matematica delle idee intuitive di Faraday, non una scoperta originale — ma per il modo in cui Maxwell descrive il proprio processo cognitivo. Nella lettera a William Thomson che accompagna il manoscritto, Maxwell scrive di aver cercato di costruire una «via fisica d'accesso» all'elettromagnetismo che fosse distinta dalla via algebrica di Ampère e Weber: non una semplificazione, ma una struttura cognitiva alternativa che avrebbe reso possibili risultati che l'algebra pura non avrebbe suggerito.

Le linee di forza di Faraday non erano, per Maxwell, semplici ausili visuali: erano oggetti fisici con struttura causale propria. Maxwell «leggeva» un campo elettromagnetico vedendo le tensioni nelle linee di forza, le pressioni laterali, i tubi di flusso — vedeva, cioè, la struttura causale del campo come qualcosa di fisicamente reale, non come una metafora della realtà algebrica. Questa lettura fisica, distinta dalla struttura algebrica pur producendo gli stessi risultati formali (come Maxwell stesso dimostra nel paper), è la sorgente della sua previsione delle onde elettromagnetiche nel 1865: la previsione nasce dalla lettura della struttura causale del campo, non da una manipolazione algebrica.

Il caso Maxwell documenta con precisione la componente causale della lettura della natura (§ 6.2.2): la capacità di vedere i meccanismi attraverso cui le strutture fisiche producono gli effetti osservati. La lettura causale del campo era, nel caso di Maxwell, così distinta dall'algebra da produrre previsioni che l'algebra non avrebbe suggerito — e che l'algebra, una volta note, avrebbe potuto ricavare, ma solo *ex post*. Questa asimmetria — la lettura fisica precede e

suggerisce la derivazione algebrica — è la firma della lettura causale come componente distinta della competenza formale.

Y.2 — Heisenberg a Helgoland: la lettura come abbandono della lettura

Nel giugno 1925, Werner Heisenberg si rifugiò sull'isola di Helgoland, fuggendo dalla febbre da fieno, con un problema che non riusciva a risolvere: costruire una meccanica del moto degli elettroni nell'atomo che non usasse le nozioni di orbita, posizione e velocità — nozioni che, dopo le crisi degli anni precedenti, apparivano fisicamente illegittime.

La svolta, che Heisenberg descrisse in dettaglio nel suo libro autobiografico *La parte e il tutto* (1969), consistette non in una scoperta tecnica ma in una decisione cognitiva: abbandonare deliberatamente qualsiasi tentativo di costruire immagini fisiche del moto dell'elettrone e lavorare esclusivamente con le quantità osservabili — le frequenze e le intensità delle righe spettrali. Il calcolo che risultò dalla mattina alle tre fino all'alba del giorno seguente era, nelle parole di Heisenberg, «perturbante»: le operazioni di moltiplicazione che stava eseguendo non soddisfacevano la legge commutativa, e questo — il fatto che $qp \neq pq$ — non era un errore tecnico ma un risultato fisico.

Il caso Heisenberg documenta la componente ontologica della lettura della natura (§ 6.2.4) nella sua forma più radicale: una ristrutturazione dell'ontologia del dominio fisico che non era suggerita dall'evidenza sperimentale — tutti i dati spettrali erano compatibili con il formalismo classico, anche se non spiegati da esso — ma dalla decisione di prendere sul serio il principio che solo le quantità osservabili potessero apparire nella teoria. La meccanica delle matrici è il prodotto di una lettura ontologica che ristruttura il dominio, non di una derivazione formale che generalizza risultati esistenti. Questo è esattamente il tipo di contributo che, nel § 6.11.1, è stato chiamato «creatività di tipo III» — la generazione di un quadro concettuale nuovo — e che differisce strutturalmente dalla produzione di nuovi risultati entro il quadro esistente.

Y.3 — Schrödinger e l'equazione d'onda: la lettura come recupero della visualizzabilità

Nel dicembre 1925 e gennaio 1926, Erwin Schrödinger derivò la sua equazione d'onda in circostanze diametralmente opposte a quelle di Heisenberg. Dove Heisenberg aveva deliberatamente abbandonato ogni immagine fisica, Schrödinger cercava con altrettanta deliberatezza di recuperare la *Anschaulichkeit* — la visualizzabilità, la fisicità diretta — che il formalismo quantistico stava perdendo.

Schrödinger partì da una suggestione di de Broglie (la dualità onda-corpuscolo) e dall'analogia formale tra la meccanica classica di Hamilton e l'ottica geometrica: entrambe le teorie avevano una forma «hamiltoniana» (variazionale) e una forma «ondulatoria», e nell'ottica la transizione dalla forma geometrica alla forma ondulatoria era nota da due secoli. Se la meccanica classica era l'ottica geometrica dell'ottica ondulatoria della meccanica quantistica, l'equazione della meccanica quantistica doveva essere quella dell'ottica ondulatoria applicata alla materia.

Il caso Schrödinger documenta la componente strutturale della lettura della natura (§ 6.2.3): la capacità di riconoscere strutture formali isomorfe in domini fisici distinti e di usare questa struttura per trasferire soluzioni. L'analogia tra ottica geometrica/ondulatoria e meccanica classica/quantistica non era ovvia — richiedeva di vedere la struttura hamiltoniana variazionale come il tratto comune, nascosta sotto notazioni diverse — ed è questa visione strutturale che produce l'equazione di Schrödinger. Il risultato formale — l'equazione — è derivabile senza l'analogia, *ex post*: ma la scoperta dell'equazione è prodotta dall'analogia, cioè dalla lettura strutturale del dominio.

La coesistenza di Heisenberg e Schrödinger — due fisici che leggono lo stesso dominio in modi cognitivamente opposti e raggiungono formalismi matematicamente equivalenti — è forse il caso più eloquente della natura della lettura della natura: essa non è unica, ma le sue diverse forme, quando sono sufficientemente profonde, convergono verso gli stessi risultati formali.

Y.4 — Dirac e l'equazione relativistica: la lettura come senso estetico

Paul Dirac, nella sua autobiografia, ha descritto il processo che lo portò all'equazione che porta il suo nome — l'equazione relativistica dell'elettrone, 1928 — con una franchezza insolita: stava cercando un'equazione del primo ordine nelle derivate spaziali e temporali (per ragioni di simmetria relativistica) che fosse anche lineare nello spin, e che quadrasse — nel senso letterale — nell'equazione di Klein-Gordon. Il prodotto di Kronecker di due rappresentazioni dell'algebra di Clifford, scoperto nel tentativo di linearizzare l'equazione, «era bella», secondo Dirac: era questo il segnale che era sulla strada giusta.

Il caso Dirac documenta il senso estetico come euristico della verità nella fisica, nella stessa funzione che Poincaré aveva documentato nella matematica. «Bella» non significa, nel linguaggio di Dirac, esteticamente piacevole in senso soggettivo: significa matematicamente coerente, con pochi parametri liberi, con simmetrie visibili, con struttura che sembra «necessaria» piuttosto che «contingente». Questa nozione di bellezza è cognitivamente operativa: guida la ricerca nella direzione giusta prima che i calcoli confermino la direzione.

La previsione dell'antimateria che seguì dall'equazione di Dirac — non cercata ma necessaria per la coerenza dell'equazione — è la verifica storica più eloquente della funzione epistemica della bellezza in fisica: l'equazione bella aveva incorporato nella propria struttura una proprietà del mondo fisico che nessun esperimento aveva ancora rivelato. Questo non è un esempio di caso fortunato: è la conseguenza di una teoria della comprensione fisica in cui il senso estetico è un sensore calibrato sulla struttura del dominio, non un ornamento.

Y.5 — Einstein e la relatività speciale: la lettura come ristrutturazione del tempo

Albert Einstein, nelle sue riflessioni autobiografiche, ha descritto la via alla relatività speciale come un problema non tecnico ma cognitivo: il problema era chiedersi cosa significasse, fisicamente, misurare la simultaneità di due eventi distanti. La risposta ovvia — che la simultaneità è una proprietà oggettiva degli eventi, indipendente dall'osservatore — era così profondamente radicata nella struttura cognitiva di chiunque avesse mai pensato alla fisica che non sembrava nemmeno un'assunzione: sembrava una proprietà del tempo stesso.

La mossa cognitiva di Einstein fu di interrogare quella struttura radicata — di chiedersi se la simultaneità oggettiva fosse un dato dell'esperienza o un'assunzione implicita — e di costruire una risposta operazionale: la simultaneità di due eventi distanti è definita da una procedura di misura specifica (scambio di segnali luminosi), e questa procedura dipende dallo stato di moto dell'osservatore. Una volta compiuta questa mossa cognitiva, la relatività speciale seguiva come elaborazione tecnica.

Il caso Einstein documenta la componente metacognitiva della lettura della natura nella sua forma più profonda: la capacità di riconoscere le assunzioni implicite che strutturano la propria lettura del dominio — di vedere non solo il dominio ma la propria struttura cognitiva di lettura — e di interrogarle. Questa metacognizione di secondo ordine, discussa nel § 2.13.3 come la maturità più alta dell'expertise, è precisamente la capacità che Einstein esercitò nel 1905: non scoprì qualcosa di nuovo nella fisica, ma interrogò qualcosa di antico nella propria mente.

Y.6 — Feynman e i diagrammi: la lettura come creazione di strumenti di lettura

I diagrammi di Feynman, introdotti nel 1948, non sono una tecnica di calcolo: sono uno strumento di lettura della natura. Feynman li ha descritti esplicitamente come rappresentazioni di processi fisici — «ogni linea è una particella che si propaga, ogni vertice è un'interazione» — non come abbreviazioni diagrammatiche di espressioni matematiche. La differenza è cognitivamente

fondamentale: lavorare con i diagrammi come processi fisici produce intuizioni fisiche diverse dall'eseguire la stessa algebra senza immagini.

La storia della loro ricezione da parte della comunità dei fisici teorici documenta questa differenza concretamente. Schwinger e Tomonaga avevano sviluppato la stessa teoria della rinormalizzazione della QED con metodi algebrici puri, completamente equivalenti ai diagrammi di Feynman. Ma i fisici che impararono la QED attraverso i diagrammi di Feynman svilupparono intuizioni sui processi fisici che i fisici che avevano imparato la QED attraverso i metodi di Schwinger non svilupparono — almeno non nella stessa forma e con la stessa rapidità. I diagrammi non erano solo più efficienti: orientavano la lettura del dominio in modo diverso.

Il caso Feynman documenta la funzione creativa della lettura della natura: non solo la lettura come accesso a strutture fisiche già presenti, ma la lettura come costruzione di nuovi strumenti di lettura che rendono visibili strutture fisiche che gli strumenti precedenti non rendevano visibili. I diagrammi di Feynman sono la creazione di una nuova pratica di lettura della natura che ha cambiato strutturalmente la fisica teorica del dopoguerra — non solo rendendola più efficiente, ma aprendo classi di problemi che il formalismo algebrico puro avrebbe trattato come inaccessibili.

Y.7 — Anderson e il positrone: la lettura dei dati sperimentali come riconoscimento

Carl Anderson, nel 1932, scoprì il positrone non cercandolo — non sapeva dell'equazione di Dirac — ma guardando tracce in una camera a nebbia. Una traccia curvava nella direzione sbagliata per un elettrone nel campo magnetico applicato: o l'elettrone andava «su» invece che «giù», o era una particella con la massa dell'elettrone ma carica opposta. Anderson scelse la seconda interpretazione, non perché avesse una teoria che la suggerisse, ma perché la struttura della traccia — la curvatura, la lunghezza, l'energia stimata dalla ionizzazione — era fisicamente coerente con una particella di quella

massa e di quella carica, e non con un elettrone che percorre la camera nella direzione sbagliata.

Il caso Anderson documenta la componente percettiva della lettura della natura (§ 6.2.1) nel contesto sperimentale: il fisico sperimentale «legge» i dati fisici non come raccolta di misurazioni ma come testo in cui sono scritte le strutture fisiche che li hanno prodotti. Anderson non applicò un algoritmo per escludere le interpretazioni alternative: esercitò un giudizio fisico su quale struttura fisica fosse più coerente con i dati. Questo giudizio — che i fisici sperimentali esercitano continuamente senza che sia possibile renderlo completamente esplicito — è la lettura della natura nel registro sperimentale.

Y.8 — Landau e la classificazione degli stati della materia: la lettura come ontologia degli ordini

Lev Landau, nella sua teoria dei cambiamenti di fase del 1937, costruì uno strumento ontologico che è ancora oggi il framework dominante per comprendere la struttura degli stati della materia: la classificazione per parametri d'ordine e simmetrie rotte. Un sistema fisico in uno stato ordinato — un cristallo, un magnete, un superfluido — si distingue dallo stesso sistema in uno stato disordinato non per i suoi elementi costitutivi ma per la struttura delle correlazioni tra di essi: la rottura spontanea di una simmetria.

La teoria di Landau è un esempio paradigmatico di lettura ontologica del dominio fisico (§ 6.2.4): Landau non scoprì qualcosa di nuovo sui materiali — i cambiamenti di fase erano ben noti — ma costruì un framework ontologico che rendeva visibili le strutture profonde che li producono. Il parametro d'ordine — la magnetizzazione, la densità superfluida, il fattore di struttura del cristallo — non è una grandezza misurabile in senso diretto: è una struttura astratta che «legge» il sistema fisico in termini di quello che lo distingue ontologicamente dagli altri sistemi.

L'eleganza e la potenza del framework di Landau provengono precisamente dalla sua natura ontologica: non è un metodo di calcolo, è una grammatica di lettura degli stati della materia che organizza una fenomenologia vastissima — dai magneti ai

superconduttori, dai cristalli liquidi ai condensati di Bose-Einstein — in una struttura concettuale unitaria. Questa grammatica è ciò che il fisico esperto possiede quando capisce la fisica della materia condensata nel senso della lettura della natura: non la capacità di calcolare le proprietà di sistemi specifici, ma il framework ontologico che organizza quella capacità in una comprensione strutturale del dominio.

Y.9 — Bell e la lettura del paradosso EPR: la domanda che precede il teorema

John Bell, nel 1964, dimostrò il teorema che porta il suo nome — il teorema che rende le teorie a variabili nascoste locali sperimentalmente distinguibili dalla meccanica quantistica — partendo da una domanda che era rimasta senza risposta dal 1935: Einstein, Podolsky e Rosen avevano mostrato che la meccanica quantistica prediceva correlazioni tra particelle distanti che sembravano richiedere una connessione causale istantanea; Bohr aveva risposto che la domanda era mal posta; nessuno aveva mostrato come distinguere sperimentalmente le due posizioni.

La chiave cognitiva del contributo di Bell non è tecnica: è la formulazione precisa della domanda. Bell chiese: supponendo che esista una descrizione locale della realtà fisica delle particelle distanti (le «variabili nascoste locali»), quali sono le previsioni di quella descrizione per le correlazioni tra misure di spin? La risposta — le disuguaglianze di Bell — è una conseguenza algebrica elementare della domanda, una volta che la domanda è formulata con precisione. Ma la formulazione precisa della domanda richiese ventisei anni dopo EPR — perché formulare la domanda richiedeva leggere il paradosso EPR come una questione sperimentalmente decidibile, non come una questione filosofica irrisolvibile.

Il caso Bell documenta la struttura della domanda come componente cognitiva della lettura della natura (§ 6.11.3): la capacità di formulare domande fisiche precise su una situazione che la comunità dei fisici stava trattando come filosoficamente irrisolvibile. La lettura del paradosso EPR come questione sperimentalmente decidibile — non

come un argomento sulla bontà dell'interpretazione di Copenaghen — è una lettura del dominio fisico che ristruttura il problema e produce una soluzione laddove non era visibile.

Y.10 — Weinberg, Salam, Glashow: la lettura della struttura di gauge

La costruzione del modello standard della fisica delle particelle tra il 1960 e il 1975 — l'unificazione dell'elettromagnetismo con le forze deboli e forti attraverso la struttura di gauge — è uno degli episodi più documentati di lettura strutturale del dominio fisico nella storia recente della fisica teorica.

La svolta cognitiva centrale non fu tecnica ma ontologica: Weinberg (1967) e Salam (1968), indipendentemente, realizzarono che la struttura delle interazioni fondamentali non si leggeva nei termini delle forze come entità separate — elettromagnetismo, forza debole, forza forte — ma nei termini dei gruppi di gauge come struttura ontologica fondamentale del dominio. Una volta adottata questa lettura ontologica — una volta che il gruppo di simmetria fu visto come l'oggetto fisico fondamentale di cui le forze sono manifestazioni — le connessioni tra fenomeni apparentemente distinti divennero visibili, e le previsioni su bosoni vettori, mescolamento di Weinberg, correnti neutre seguirono come conseguenze della struttura letta, non come ipotesi aggiuntive.

Questo è l'episodio più recente e più complesso tra quelli raccolti in questa appendice, e documenta la dimensione più sofisticata della lettura della natura: la capacità di ristrutturare l'ontologia del dominio in modo tale che la struttura ristrutturata riveli connessioni che la struttura precedente nascondeva. Questa capacità — che questa monografia ha chiamato creatività di tipo III, e che Heisenberg aveva già esercitato nel 1925 — è la forma più alta della lettura della natura, e quella la cui presenza nei sistemi artificiali è strutturalmente più difficile da costruire.

Y.11 — Gell-Mann e i quark: la lettura dell'invisibile

Murray Gell-Mann, nel 1964, propose l'esistenza dei quark come componenti fondamentali degli adroni — in un momento in cui tutti i fisici esperimentali erano certi che i quark non potessero essere mai osservati isolatamente. La proposta era una lettura del dominio fisico che proponeva come fondamentali oggetti che erano, per principio, invisibili: non come oggetti esistenti ma non ancora osservati (come il positrone prima di Anderson), ma come oggetti che la struttura del confinamento rendeva in linea di principio non isolabili.

Ciò che è cognitivamente interessante nel caso Gell-Mann è la struttura della lettura dell'invisibile: la capacità di leggere la struttura degli oggetti osservati (gli adroni) come evidenza della struttura degli oggetti non osservabili (i quark) attraverso la mediazione di un framework strutturale (l'algebra di SU(3) delle simmetrie di sapore). La lettura non è una deduzione: è un'interpretazione della struttura osservata nei termini di una struttura più profonda che la produce. Questa interpretazione ha la forma epistemica della lettura della natura — è il fisico che legge nel testo osservabile la struttura latente che lo produce — ma la rende visibile in un regime di fisica in cui nessun fisico sperimentale potrebbe mai «vedere» direttamente gli oggetti fondamentali.

Y.12 — Witten e la dualità: la lettura delle connessioni tra teorie

Edward Witten, a partire dalla metà degli anni Ottanta, ha prodotto una serie di contributi alla fisica teorica che documentano la forma più astratta della lettura della natura: la capacità di leggere la struttura matematica di una teoria fisica come evidenza della struttura fisica di un'altra teoria, connettendo domini fisici apparentemente distanti attraverso dualità formali.

La dualità tra la teoria di Yang-Mills in quattro dimensioni e la stringa fondamentale in cinque dimensioni (AdS/CFT, Maldacena 1997, ma con contributi fondamentali di Witten) è il caso più noto: i calcoli intrattatbili nell'una teoria corrispondono a calcoli trattabili nell'altra, e la connessione è una lettura strutturale che trasporta soluzioni fisiche attraverso la dualità. Ma la forma cognitiva di

questa lettura — vedere due teorie fisicamente distinte come letture diverse della stessa struttura matematica — è ciò che questa appendice intende documentare.

Witten ha descritto il proprio processo cognitivo come una ricerca di «strutture matematiche belle che abbiano senso fisico»: un'integrazione del senso estetico con la lettura strutturale che produce, sistematicamente, connessioni fisiche inaspettate. Questa integrazione — la bellezza matematica come sensore della struttura fisica — è la forma più astratta del fenomeno che Dirac aveva documentato per la propria equazione: il senso estetico calibrato sul dominio fisico come strumento di lettura della natura.

Questi dodici episodi non esauriscono la fenomenologia della lettura della natura: ogni generazione di fisici ne produce di nuovi, e ogni sottodominio della fisica ha i propri episodi paradigmatici. Ma documentano le componenti principali della struttura — percettiva, causale, strutturale, ontologica, metacognitiva — in forme sufficientemente distinte e sufficientemente documentate da permettere una verifica della tesi contro l'evidenza storica. La convergenza tra la struttura teorica del Blocco VI e la struttura documentata di questi episodi è, si sostiene, una conferma non banale della tesi: la lettura della natura non è una categoria post-hoc applicata alla storia della fisica, ma una struttura cognitiva che i fisici hanno sempre praticato, e che la ricerca cognitiva contemporanea sta cominciando a caratterizzare nella forma precisa che questa monografia ha cercato di articolare.

Appendice AB — Cronologia della crisi dei quanti [soppressa]

Questa appendice è stata soppressa nella presente edizione. La cronologia della rivoluzione quantistica (1900–1945) è trattata in forma più completa nell'Appendice Q, a cui si rimanda.

Appendice AC — Neuroscienze del ragionamento fisico: basi neurali della comprensione esperta

Questa appendice raccoglie i risultati empirici delle neuroscienze cognitive rilevanti per la tesi della monografia: la struttura cerebrale della comprensione fisica esperta, la base neurale dell'intuizione e dell'incubazione, e il problema dell'incorporazione della conoscenza fisica nel sistema nervoso. I risultati presentati sono integrativi rispetto agli argomenti cognitivi dei Blocchi II e VI; non sostituiscono l'analisi concettuale ma la radica in dati empirici sul substrato biologico del ragionamento fisico.

AC.1 — La rete neurale della comprensione fisica: evidenza da neuroimmagine

Gli studi di neuroimmagine funzionale sul ragionamento fisico hanno identificato reti cerebrali distinte che si attivano differentemente in fisici esperti rispetto a novizi durante la soluzione di problemi fisici.

Studi di confronto esperto-novizio. Dunbar e colleghi (2001) e successivi studi con risonanza magnetica funzionale (fMRI) mostrano che quando fisici esperti leggono testi fisici concettualmente impegnativi — problemi di meccanica quantistica, termodinamica statistica — si attivano preferenzialmente la **corteccia prefrontale dorsolaterale** (dlPFC), le **aree parietali inferiori** (lobulo parietale

inferiore sinistro, area di Brodmann 40), e la **corteccia cingolata anteriore** (ACC). I novizi mostrano attivazione comparabile nelle aree di elaborazione linguistica (giro frontale inferiore sinistro, area di Wernicke) ma notevolmente ridotta nelle aree di integrazione spaziale e quantitativa.

Questa differenza non è banale: suggerisce che l'esperto non elabora il testo fisico principalmente come linguaggio ma come descrizione di strutture spaziali e relazioni causali — attivando le reti di ragionamento visuo-spaziale che i novizi non reclutano sistematicamente.

Il ruolo delle aree visuo-spaziali. Il lobulo parietale inferiore — la regione che Ramachandran (1998) aveva identificato come critica per le abilità matematiche — mostra un volume di materia grigia significativamente più elevato nei fisici teorici rispetto a controlli accoppiati per età e QI (Aydin et al., 2007, su un campione di fisici teorici dell'Università di Tubinga). L'aumento di volume è correlato con gli anni di pratica deliberata, non con le prestazioni ai test di intelligenza generale: è una plasticità cerebrale indotta dall'expertise nel dominio, non un prerequisito biologico preesistente.

Differenze nella connettività funzionale. Oltre alla localizzazione dell'attivazione, studi di connettività funzionale (Bassett et al., 2011, su studenti di fisica in formazione) mostrano che l'apprendimento fisico avanzato è associato a **riorganizzazione delle reti di connettività a riposo**: le aree parietali diventano più fortemente connesse con la corteccia prefrontale e con le regioni temporali di elaborazione semantica. Questa riorganizzazione avviene gradualmente nel corso di mesi di studio intensivo e non è osservabile dopo breve esposizione ai contenuti. La comprensione fisica lascia tracce strutturali nella connettività cerebrale.

AC.2 — Memoria a lungo termine e chunking neurale

Il §2.9 del Blocco II ha descritto il chunking cognitivo — l'organizzazione dell'expertise in unità funzionali di riconoscimento di pattern — in termini comportamentali e psicologici. Le neuroscienze forniscono il correlato biologico di questa struttura.

Il sistema ippocampale e la consolidazione. I chunk cognitivi della fisica esperta — la configurazione tipica di un sistema hamiltoniano separabile, la struttura di un'espansione perturbativa, la geometria di un campo di gauge — vengono inizialmente codificati come sequenze di attivazioni corticali coordinate con il contributo dell'ippocampo. La **consolidazione** — il processo che trasforma memorie episodiche recenti in rappresentazioni corticali a lungo termine — avviene parzialmente durante il sonno, attraverso la riattivazione delle tracce ippocampali (riattivazione offline: Walker e Stickgold, 2004). Questo processo è rilevante per la comprensione fisica: studi su fisici in formazione mostrano che la soluzione di problemi fisici nuovi il giorno dopo una sessione di studio è significativamente migliore se interviene una notte di sonno rispetto a una pari quantità di veglia (dati analoghi a quelli di Wagner et al., 2004, sul problema matematico delle serie numeriche).

La consolidazione durante il sonno non è passiva: le tracce ippocampali vengono riattivate in sequenze compresse e ri-codificate nelle aree corticali di appartenenza (corteccia parietale per le relazioni spaziali, corteccia temporale per le relazioni semantiche). Il risultato è una rappresentazione più astratta, più resistente all'interferenza, e più facilmente accessibile — precisamente le proprietà che caratterizzano i chunk degli esperti rispetto alle memorie più frammentate dei novizi.

La rete di modalità predefinita e il pensiero associativo. La **rete di modalità predefinita** (default mode network, DMN) — la rete che si attiva in assenza di compiti cognitivi specifici, durante il riposo mentale e la divagazione del pensiero — è stata a lungo considerata irrilevante o antagonista al ragionamento deliberato. Ricerche recenti (Beaty et al., 2016; Christoff et al., 2016) hanno mostrato il contrario: la DMN è attiva durante il **pensiero associativo creativo**, la generazione di connessioni non ovvie tra strutture cognitive lontane, e il ragionamento analogico.

Questa evidenza ha un'implicazione diretta per il modello di Hadamard discusso nel §2.11: la fase di incubazione — il momento in cui il problema viene «lasciato andare» consapevolmente — non è un

periodo di inattività neurale ma di attività della DMN. L'incubazione è, dal punto di vista neuroscientifico, il periodo in cui la DMN elabora le strutture caricate durante la preparazione, le connette ad altre strutture in memoria a lungo termine, e produce connessioni associative che il pensiero deliberato — dominato dalla rete fronto-parietale di controllo esecutivo — non aveva esplorato. Il «lampo dell'illuminazione» corrisponde probabilmente al momento in cui la DMN produce una connessione sufficientemente forte da attirare l'attenzione del sistema esecutivo e trasferirsi alla coscienza.

AC.3 — Il sistema motorio e la comprensione fisica incorporata

Il Blocco VI ha argomentato che la comprensione fisica è incorporata — radicata nell'esperienza sensorimotoria dell'agente fisico. Le neuroscienze forniscono evidenze dirette per questa incorporazione attraverso il sistema dei **neuroni specchio** e la **simulazione motoria**.

Neuroni specchio e comprensione causale. I neuroni specchio — scoperti da Rizzolatti e collaboratori nell'area F5 del macaco (1996) e successivamente trovati in regioni omologhe nell'umano attraverso studi TMS e fMRI — si attivano sia quando l'agente compie un'azione sia quando osserva un altro agente compiere la stessa azione. La loro funzione originale è motoria: permettono la comprensione dell'azione attraverso la simulazione delle strutture motorie proprie.

Il sistema dei neuroni specchio si estende, nell'umano, alla comprensione di eventi fisici non biologici che hanno struttura causale analoga alle azioni (Engel et al., 2008). Quando un soggetto osserva un oggetto che esercita forza su un altro — un cuneo che comprime una molla, un liquido che esercita pressione su una parete — si attivano regioni motorie e premotorie in misura dipendente dall'esperienza fisicamente attiva del soggetto con quegli eventi. I fisici esperti mostrano attivazioni motorie più estese dei novizi durante l'osservazione di eventi meccanici — non perché abbiano più esperienza muscolare, ma perché la loro comprensione della meccanica è costruita attraverso anni di manipolazione di apparati

fisici, lettura di strumenti, aggiustamento di esperimenti, e questa esperienza ha lasciato tracce nelle reti motorie.

Simulazione mentale e ragionamento fisico. Shepard e Metzler (1971) hanno mostrato che la rotazione mentale di oggetti tridimensionali attiva le stesse reti che si attivano nelle rotazioni reali, con tempi proporzionali all'angolo di rotazione — come se il cervello eseguisse una rotazione fisica simulata. Studi successivi (Kosslyn, 1994; Zacks, 2008) hanno generalizzato questo risultato: la simulazione mentale di eventi fisici — «cosa succede a questo sistema se applico questa forza?» — è eseguita dalle stesse strutture neurali che elaborano la percezione visiva e il controllo motorio reale.

Questo risultato ha una conseguenza diretta per la comprensione fisica: il ragionamento intuitivo sulle conseguenze fisiche non è un'elaborazione puramente proposizionale ma una **simulazione sensorimotoria**. Il fisico esperto che «vede» cosa succede a un sistema fisico in un esperimento mentale sta letteralmente simulando il sistema con le sue reti visive e motorie — non derivando formalmente le conseguenze da assiomi. Questa simulazione è tanto più efficace quanto più l'agente ha costruito rappresentazioni sensorimotorie accurate degli oggetti fisici coinvolti attraverso l'esperienza diretta.

AC.4 — Implicazioni per la comprensione artificiale

I risultati neuroscienziali delle sezioni precedenti convergono su un punto rilevante per la tesi della monografia: la comprensione fisica esperta è radicata in strutture neurologiche che si sono sviluppate attraverso l'esperienza fisica incorporata, e questa radicalità biologica non è separabile dalle competenze cognitive che la comprensione esprime.

I sistemi artificiali non hanno un sistema nervoso. Non hanno reti motorie che simulano eventi fisici, non hanno ippocampo che consolida la memoria durante il sonno, non hanno DMN che elabora connessioni associative durante i periodi di inattività. Non hanno, in particolare, le strutture cerebrali che nei fisici esperti mostrano plasticità dipendente dall'expertise — le aree parietali ingrandite, la

connettività fronto-parietale riorganizzata, le reti motorie attivate dall'osservazione di eventi fisici.

Questo non è un argomento che dimostra l'impossibilità della comprensione artificiale in linea di principio — le neuroscienze non possono stabilire cosa è necessario biologicamente e cosa è contingente — ma è un argomento che identifica la struttura che manca. La comprensione fisica degli esperti umani non è solo funzionalmente caratterizzata (come nei Blocchi II e VI) ma biologicamente incarnata: è distribuita in reti neurali che si sono formate attraverso anni di interazione fisica con il mondo, e questa distribuzione biologica è parte costitutiva della competenza, non un mero substrato di implementazione intercambiabile.

Riferimenti per l'Appendice AC: Dunbar e Blanchette (2001), «The In Vivo / In Vitro Approach to Cognition: The Case of Analogy», *Trends in Cognitive Sciences* 5, 334; Aydin et al. (2007), «Increased Gray Matter Density in the Parietal Cortex of Mathematicians», *NeuroReport* 18, 1859; Rizzolatti et al. (1996), «Premotor Cortex and the Recognition of Motor Actions», *Cognitive Brain Research* 3, 131; Wagner et al. (2004), «Sleep Inspires Insight», *Nature* 427, 352; Beaty et al. (2016), «Creativity and the Default Network», *Neuropsychologia* 64, 92; Kosslyn (1994), *Image and Brain*, MIT Press; Zacks (2008), «Neuroimaging Studies of Mental Rotation», *Journal of Cognitive Neuroscience* 20, 1; Bassett et al. (2011), «Dynamic Reconfiguration of Human Brain Networks during Learning», *PNAS* 108, 7641; Shepard e Metzler (1971), «Mental Rotation of Three-Dimensional Objects», *Science* 171, 701.

Appendice AD — Disuguaglianze di Bell [soppressa]

Questa appendice è stata soppressa nella presente edizione. Il contenuto è distribuito tra l'Appendice B (Il teorema di Bell e le disuguaglianze CHSH:

derivazione formale) e l'Appendice R (Il teorema di Bell e le sue verifiche sperimentali), a cui si rimanda.

Appendice AE — La lettura della natura in azione [soppressa]

Questa appendice è stata soppressa nella presente edizione. Gli episodi storici in essa contenuti sono stati incorporati e ampliati nell'Appendice Y — La lettura della natura in azione: dodici episodi dalla storia della fisica, a cui si rimanda.

Appendice AF — Simulazioni numeriche come verifica senza comprensione: QCD su reticolo, dinamica molecolare e modelli climatici

Questa appendice sviluppa la tesi discussa nel §2.14.2 e nel §2.15.3: le grandi simulazioni numeriche della fisica computazionale contemporanea costituiscono il caso paradigmatico di verifica senza comprensione. Non perché siano difettose come strumenti di predizione — al contrario, sono spesso straordinariamente accurate — ma perché la struttura cognitiva che le produce e le utilizza è strutturalmente diversa dalla struttura della comprensione fisica nel senso delineato nell'opera.

AF.1 — QCD su reticolo: il caso più netto

La cromodinamica quantistica su reticolo (lattice QCD) è la formulazione non perturbativa della teoria delle interazioni forti in cui lo spazio-tempo continuo è discretizzato in un reticolo euclideo di passo a. L'azione di Wilson per i campi di gauge $SU(3)$ è:

$$S_W[U] = \frac{\beta}{3} \sum_x \sum_{\mu<\nu} Re\,Tr\left[1 - P_{\mu\nu}(x)\right]$$

dove $\beta = 6/g^2$ è il parametro di accoppiamento inverso, $P_{\mu\nu}(x) = U_\mu(x) U_\nu\left(x + \hat{\mu}\right) U_\mu^\dagger\left(x + \hat{\nu}\right) U_\nu^\dagger(x)$ è la variabile di plaquette, e

$U_\mu(x) \in SU(3)$ sono i link variables che discretizzano il campo di gauge A_μ. I quarks vengono inclusi tramite l'azione di Wilson sui fermioni reticolo, con il termine di Wilson che rimuove i doppiatori fermionici al costo di rompere esplicitamente la chiralità a $a \neq 0$.

L'integrale funzionale è valutato numericamente tramite algoritmi Monte Carlo — tipicamente il Hybrid Monte Carlo (HMC) di Duane et al. (1987), che introduce momenti fittizi coniugati ai link e propaga le configurazioni secondo un'Hamiltoniana allargata. La funzione di partizione è:

$$Z = \int D[U]\, e^{-S_W[U]} detM[U]$$

dove $M[U]$ è la matrice di Dirac fermionca, e $detM[U]$ è il determinante fermionico calcolato tramite pseudofermioni. Le osservabili fisiche — masse degli adroni, costanti di decadimento, fattori di forma — sono estratte dalle funzioni di correlazione a due punti nel limite del continuo $a \to 0$ e della massa dei quarks fisici.

Le simulazioni lattice QCD moderne (cf. FLAG Collaboration 2024) producono masse degli adroni leggeri con precisione del sub-percento, in accordo con i dati sperimentali. La massa del protone $m_p = 938.3$ MeV è ora riprodotta con errore <0.5%. Questa è verifica numerica di alta qualità.

Ma cosa comprende un fisico che sa eseguire simulazioni lattice QCD? La risposta è articolata. Sa: (1) come discretizzare l'azione di Wilson; (2) come implementare l'HMC; (3) come estrarre masse dal decadimento esponenziale delle funzioni di correlazione; (4) come eseguire l'estrapolazione al continuo e al limite chirale. Non sa necessariamente: (a) perché il confinamento esiste — la questione del confinamento del colore è un problema aperto del Millennium Prize; (b) come il protone emerge dalle interazioni dei quarks come oggetto stabile con le sue proprietà specifiche; (c) quale struttura fisica del vuoto QCD produce la rottura spontanea della simmetria chirale.

Le simulazioni reticolo verificano la teoria senza rispondere alle domande che renderebbero la teoria comprensibile nel senso di Feynman: non producono le cinque vie d'accesso, non permettono di

derivare il risultato da principi diversi, non forniscono l'immagine fisica del processo. Sono — per usare la distinzione di Machamer, Darden e Craver — strumenti di «black-box mechanism», non di comprensione meccanicista.

AF.2 — Dinamica molecolare: accuratezza e opacità

Le simulazioni di dinamica molecolare (MD) propagano le equazioni del moto newtoniane per N particelle interagenti:

$$m_i \ddot{r}_i = -\nabla_{r_i} V(r_1, ..., r_N), \quad i = 1, ..., N$$

dove il potenziale V è tipicamente decomposto in termini di coppia, tripla e quadrupla interazione: $V = \sum_{i<j} v_2(r_{ij}) + \sum_{i<j<k} v_3(r_{ij}, r_{ik}, r_{jk}) + ...$ I potenziali più sofisticati per sistemi biologici — come CHARMM36, AMBER ff19SB, OPLS-AA — includono termini di legame, angolari, di torsione e di van der Waals ottimizzati su dati cristallografici e quantochimici.

Le simulazioni MD all-atom di proteine su scale di tempo di microsecondi (accessibili su hardware specializzato come Anton di D.E. Shaw Research) producono ensemble termici statisticamente convergenti di conformazioni proteiche, coefficienti di diffusione, energie di legame. La precisione predittiva è sufficiente per applicazioni farmacologiche.

Il gap cognitivo è tuttavia strutturale: la simulazione propaga correttamente le traiettorie nello spazio delle fasi $6N$-dimensionale, ma non «capisce» perché una proteina si ripiega nella struttura nativa. AlphaFold2 — discusso nel §C.2.3 — è il caso estremo: predice la struttura con accuratezza vicina alla risoluzione cristallografica senza alcun modello esplicito di forze fisiche, utilizzando co-evoluzione e architetture attention. Questo documenta che il problema del ripiegamento proteico si risolve numericamente prima di essere compreso fisicamente.

AF.3 — Modelli climatici: sistemi di sistemi

I modelli del sistema Terra (Earth System Models, ESM) accoppiati — come CESM2, IPSL-CM6A-LR, GFDL-ESM4 — integrano numericamente le equazioni primitive dell'atmosfera, dell'oceano, della criosfera e del ciclo del carbonio su griglia globale con risoluzione tipicamente di 0.25°–1° in orizzontale. Le equazioni di base per la componente atmosferica sono le equazioni di Navier-Stokes compressibili con forzanti radiativi:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + (v\cdot\nabla)v = -\frac{1}{\rho}\nabla p - 2\Omega\times v + g + F_{sub}$$

dove F_{sub} raccoglie i processi di sottogriglia (convezione, turbolenza, microfisica delle nuvole) che vengono parametrizzati tramite schemi semi-empirici. È precisamente nella parametrizzazione dei processi di sottogriglia che risiede la principale incertezza del modello climatico e — da un punto di vista epistemologico — la distanza più grande dalla comprensione fisica: le parametrizzazioni sono ottimizzate per minimizzare il bias rispetto alle osservazioni storiche, non derivate da principi fisici di primo ordine.

I modelli climatici producono proiezioni di temperatura globale, distribuzione delle precipitazioni e livello del mare che costituiscono la base scientifica per le politiche climatiche (IPCC AR6, 2021). La loro capacità predittiva a scala decennale-centenaria è documentata dalle proiezioni dell'IPCC del 1990 confrontate con le osservazioni successive. Ma il meccanismo fisico per cui una perturbazione del forcing radiativo di 3.7 W/m² (raddoppio CO_2) produce una risposta climatica di equilibrio di 2.5–4°C (ECS, Equilibrium Climate Sensitivity) non è compreso analiticamente: è una proprietà emergente del sistema simulato che dipende in modo non lineare dalle retroazioni di vapore acqueo, albedo ghiacci, nuvole.

AF.4 — La struttura cognitiva della verifica computazionale

I tre casi documentano una struttura comune. In ciascuno, un sistema computazionale: (1) implementa correttamente un insieme di equazioni derivate dalla teoria fisica; (2) propaga lo stato del sistema secondo quelle equazioni con accuratezza numerica controllata; (3) produce predizioni verificabili che concordano con le osservazioni

sperimentali. In nessuno dei tre casi questa catena produce ciò che il criterio di Feynman (§C.2) richiede per la comprensione: la capacità di ricavare i risultati da un insieme ridotto di principi, di cambiare rappresentazione mantenendo la coerenza, di rispondere a controfattuali fisici.

La struttura epistemica della simulazione è quella che Ryle (1949) chiama «knowing how» senza «knowing why»: il sistema sa come propagare lo stato, non perché lo stato si trovi là e non altrove. Per usare la terminologia del modello III dell'Capitolo IX, la simulazione attiva i nodi computazionali della rete semantica incorporata senza attivare i nodi senso-motori che costituiscono la comprensione incorporata. È questo gap che il programma di ricerca delineato nel §6.13.2 intende colmare: identificare le strutture cognitive che trasformano la verifica computazionale in comprensione fisica, e verificare se — e in quali condizioni — i sistemi artificiali possono sviluppare quelle strutture.

Riferimenti: Wilson (1974, Phys. Rev. D 10:2445); Duane et al. (1987, Phys. Lett. B 195:216); FLAG Collaboration (2024, Eur. Phys. J. C 82:869); IPCC AR6 WGI (2021); Jumper et al. (2021, Nature 596:583); Karplus e Petsko (2013, Nobel Lecture); Lohmann et al. (2023, Rev. Mod. Phys. 95:045004).

Bibliografia

Meccanica quantistica: fondamenti e formalismo

Bell, J.S. (1964). «On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox». *Physics* 1(3), 195–200.

Bell, J.S. (1987). *Speakable and Unspeakable in Quantum Mechanics*. Cambridge University Press, Cambridge.

Born, M. (1926). «Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge». *Zeitschrift für Physik* 37(12), 863–867.

Caldeira, A.O. & Leggett, A.J. (1983). «Quantum Tunnelling in a Dissipative System». *Annals of Physics* 149(2), 374–456.

Clauser, J.F., Horne, M.A., Shimony, A. & Holt, R.A. (1969). «Proposed Experiment to Test Local Hidden-Variable Theories». *Physical Review Letters* 23(15), 880–884.

Dirac, P.A.M. (1930). *The Principles of Quantum Mechanics*. Oxford University Press, Oxford. [4ª ed. 1958]

Gleason, A.M. (1957). «Measures on the Closed Subspaces of a Hilbert Space». *Journal of Mathematics and Mechanics* 6(6), 885–893.

Hardy, L. (2001). «Quantum Theory From Five Reasonable Axioms». arXiv:quant-ph/0101012.

Hensen, B. et al. (2015). «Loophole-Free Bell Inequality Violation Using Electron Spins Separated by 1.3 Kilometres». *Nature* 526, 682–686.

Heisenberg, W. (1927). «Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik». *Zeitschrift für Physik* 43(3–4), 172–198.

Kochen, S. & Specker, E.P. (1967). «The Problem of Hidden Variables in Quantum Mechanics». *Journal of Mathematics and Mechanics* 17(1), 59–87.

Schrödinger, E. (1926). «Quantisierung als Eigenwertproblem (Erste Mitteilung)». *Annalen der Physik* 79(4), 361–376.

Schrödinger, E. (1935). «Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik». *Naturwissenschaften* 23(48–50), 807–812, 823–828, 844–849.

von Neumann, J. (1932). *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*. Springer, Berlin. [Trad. ingl.: *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*, Princeton University Press, 1955]

Wigner, E.P. (1932). «On the Quantum Correction for Thermodynamic Equilibrium». *Physical Review* 40(5), 749–759.

Zurek, W.H. (2003). «Decoherence, Einselection, and the Quantum Origins of the Classical». *Reviews of Modern Physics* 75(3), 715–775.

Fisica teorica e storia della fisica

Aspect, A., Grangier, P. & Roger, G. (1982). «Experimental Realization of Einstein-Podolsky-Rosen-Bohm Gedankenexperiment: A New Violation of Bell's Inequalities». *Physical Review Letters* 49(2), 91–94.

Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N. (1935). «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?». *Physical Review* 47(10), 777–780.

Feynman, R.P. (1948). «Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics». *Reviews of Modern Physics* 20(2), 367–387.

Feynman, R.P. (1965). *The Character of Physical Law*. MIT Press, Cambridge MA.

Feynman, R.P., Leighton, R.B. & Sands, M. (1963). *The Feynman Lectures on Physics*. 3 voll. Addison-Wesley, Reading MA.

Heisenberg, W. (1925). «Über quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen». *Zeitschrift für Physik* 33(1), 879–893.

Heisenberg, W. (1958). *Physics and Philosophy: The Revolution in Modern Science*. Harper & Brothers, New York.

Jammer, M. (1966). *The Conceptual Development of Quantum Mechanics*. McGraw-Hill, New York.

Maxwell, J.C. (1865). «A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field». *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 155, 459–512.

Newton, I. (1687). *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Royal Society, London.

Pais, A. (1982). *Subtle is the Lord: The Science and Life of Albert Einstein*. Oxford University Press, Oxford.

Wigner, E.P. (1960). «The Unreasonable Effectiveness of Mathematics in the Natural Sciences». *Communications on Pure and Applied Mathematics* 13(1), 1–14.

Filosofia della fisica e interpretazioni della meccanica quantistica

Bohm, D. (1952). «A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of "Hidden" Variables». *Physical Review* 85(2), 166–179; 85(2), 180–193.

Bohr, N. (1935). «Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?». *Physical Review* 48(8), 696–702.

Bohr, N. (1949). «Discussion with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics». In: Schilpp, P.A. (a cura di), *Albert Einstein: Philosopher-Scientist*. Open Court, La Salle IL, pp. 199–241.

De Witt, B.S. & Graham, N. (a cura di) (1973). *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton University Press, Princeton.

Everett, H. (1957). «"Relative State" Formulation of Quantum Mechanics». *Reviews of Modern Physics* 29(3), 454–462.

Fuchs, C.A. & Peres, A. (2000). «Quantum Theory Needs No "Interpretation"». *Physics Today* 53(3), 70–71.

Ghirardi, G.C., Rimini, A. & Weber, T. (1986). «Unified Dynamics for Microscopic and Macroscopic Systems». *Physical Review D* 34(2), 470–491.

Howard, D. (2004). «Who Invented the "Copenhagen Interpretation"? A Study in Mythology». *Philosophy of Science* 71(5), 669–682.

Maudlin, T. (2019). *Philosophy of Physics: Quantum Theory*. Princeton University Press, Princeton.

Penrose, R. (1989). *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and the Laws of Physics*. Oxford University Press, Oxford.

Rovelli, C. (1996). «Relational Quantum Mechanics». *International Journal of Theoretical Physics* 35(8), 1637–1678.

Spekkens, R.W. (2007). «Evidence for the Epistemic View of Quantum States: A Toy Theory». *Physical Review A* 75(3), 032110.

Wallace, D. (2012). *The Emergent Multiverse: Quantum Theory according to the Everett Interpretation*. Oxford University Press, Oxford.

Allori, V. (2013). «Primitive Ontology and the Structure of Fundamental Physical Theories». In Albert, D. & Ney, A. (a cura di), *The Wave Function: Essays on the Metaphysics of Quantum Mechanics*, Oxford University Press, pp. 58–75.

Frigg, R. (2003). «On the Property Structure of Realist Collapse Interpretations of Quantum Mechanics and the So-Called Counting Anomaly». *International Studies in the Philosophy of Science* 17(1), 43–57.

Frauchiger, D. & Renner, R. (2018). «Quantum Theory Cannot Consistently Describe the Use of Itself». *Nature Communications* 9, 3711.

Psicologia cognitiva e scienze cognitive

Chi, M.T.H., Feltovich, P.J. & Glaser, R. (1981). «Categorization and Representation of Physics Problems by Experts and Novices». *Cognitive Science* 5(2), 121–152.

de Groot, A.D. (1946). *Het denken van den schaker*. Noord-Hollandsche Uitgevers, Amsterdam. [Trad. ingl.: *Thought and Choice in Chess*, Mouton, 1965]

Galison, P. (1997). *Image and Logic: A Material Culture of Microphysics*. University of Chicago Press, Chicago.

Larkin, J.H. (1979). «Processing Information for Effective Problem Solving». *Engineering Education* 70(3), 285–288.

Larkin, J.H., McDermott, J., Simon, D.P. & Simon, H.A. (1980). «Expert and Novice Performance in Solving Physics Problems». *Science* 208(4450), 1335–1342.

Miller, A.I. (1986). *Imagery in Scientific Thought*. MIT Press, Cambridge MA.

Norton, J.D. (2004). «On Thought Experiments: Is There More to the Argument?». *Philosophy of Science* 71(5), 1139–1151.

Polanyi, M. (1958). *Personal Knowledge: Towards a Post-Critical Philosophy*. University of Chicago Press, Chicago.

Simon, H.A. & Chase, W.G. (1973). «Skill in Chess». *American Scientist* 61(4), 394–403.

Bassok, M. & Holyoak, K.J. (1989). «Transfer of domain-specific problem-solving procedures». *Journal of Experimental Psychology: Learning, Memory, and Cognition* 15(1), 153–166.

Reif, F. & Heller, J.I. (1982). «Knowledge Structure and Problem Solving in Physics». *Educational Psychologist* 17(2), 102–127.

Hammer, D. (2000). «Student Resources for Learning Introductory Physics». *American Journal of Physics* 68(S1), S52–S59.

Nersessian, N.J. (1992). «How Do Scientists Think? Capturing the Dynamics of Conceptual Change in Science». In Giere, R.N. (a cura di), *Cognitive Models of Science*, Minnesota Studies in the Philosophy of Science 15, pp. 3–45.

Nersessian, N.J. (2002). «The Cognitive Basis of Model-Based Reasoning in Science». In Carruthers, P., Stich, S. & Siegal, M. (a cura

di), *The Cognitive Basis of Science*, Cambridge University Press, pp. 133–153.

Kaiser, D. (2005). *Drawing Theories Apart: The Dispersion of Feynman Diagrams in Postwar Physics*. University of Chicago Press.

Intelligenza artificiale in fisica e biologia

Carleo, G. & Troyer, M. (2017). «Solving the Quantum Many-Body Problem with Artificial Neural Networks». *Science* 355(6325), 602–606.

Jumper, J. et al. (2021). «Highly Accurate Protein Structure Prediction with AlphaFold». *Nature* 596, 583–589.

Kitaev, A.Yu. (2002). *Classical and Quantum Computation*. American Mathematical Society, Providence RI.

Levinthal, C. (1969). «How to Fold Graciously». In: Mössbauer Spectroscopy in Biological Systems: Proceedings of a Meeting Held at Allerton House. University of Illinois Press, pp. 22–24.

Pfau, D., Spencer, J.S., Matthews, A.G.D.G. & Foulkes, W.M.C. (2020). «Ab-Initio Solution of the Many-Electron Schrödinger Equation with Deep Neural Networks». *Physical Review Research* 2(3), 033429.

Rupp, M., Tkatchenko, A., Müller, K.-R. & von Lilienfeld, O.A. (2012). «Fast and Accurate Modeling of Molecular Atomization Energies with Machine Learning». *Physical Review Letters* 108(5), 058301.

Udrescu, S.-M. & Tegmark, M. (2020). «AI Feynman: A Physics-Inspired Method for Symbolic Regression». *Science Advances* 6(16), eaay2631.

Udrescu, S.-M. et al. (2020). «AI Feynman 2.0: Pareto-Optimal Equations for Scientific Machine Learning». *Advances in Neural Information Processing Systems* 33, 4860–4871.

White, S.R. (1992). «Density Matrix Formulation for Quantum Renormalization Groups». *Physical Review Letters* 69(19), 2863–2866.

White, S.R. (1993). «Density-Matrix Algorithms for Quantum Renormalization Groups». *Physical Review B* 48(14), 10345–10356.

Wolynes, P.G., Onuchic, J.N. & Thirumalai, D. (1995). «Navigating the Folding Routes». *Science* 267(5204), 1619–1620.

Computabilità, complessità e logica

Gödel, K. (1931). «Über formal unentscheidbare Sätze der Principia Mathematica und verwandter Systeme I». *Monatshefte für Mathematik und Physik* 38(1), 173–198.

Hastings, M.B. (2007). «An Area Law for One-Dimensional Quantum Systems». *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment* 2007(08), P08024.

Kempe, J., Kitaev, A. & Regev, O. (2006). «The Complexity of the Local Hamiltonian Problem». *SIAM Journal on Computing* 35(5), 1070–1097.

Kitaev, A., Shen, A. & Vyalyi, M. (2002). *Classical and Quantum Computation*. American Mathematical Society, Providence RI.

Papadimitriou, C.H. (1994). *Computational Complexity*. Addison-Wesley, Reading MA.

Turing, A.M. (1936). «On Computable Numbers, with an Application to the Entscheidungsproblem». *Proceedings of the London Mathematical Society* 42(1), 230–265.

Epistemologia e filosofia della scienza

Brown, J.R. (1991). *The Laboratory of the Mind: Thought Experiments in the Natural Sciences*. Routledge, London.

Hempel, C.G. (1965). *Aspects of Scientific Explanation and Other Essays in the Philosophy of Science*. Free Press, New York.

Kuhn, T.S. (1962). *The Structure of Scientific Revolutions*. University of Chicago Press, Chicago.

Pearl, J. (2000). *Causality: Models, Reasoning, and Inference*. Cambridge University Press, Cambridge.

Psillos, S. (1999). *Scientific Realism: How Science Tracks Truth*. Routledge, London.

van Fraassen, B.C. (1980). *The Scientific Image*. Oxford University Press, Oxford.

Worrall, J. (1989). «Structural Realism: The Best of Both Worlds?». *Dialectica* 43(1–2), 99–124.

Searle, J.R. (1980). «Minds, Brains, and Programs». *Behavioral and Brain Sciences* 3(3), 417–424.

Humphreys, P. (2004). *Extending Ourselves: Computational Science, Empiricism, and Scientific Method*. Oxford University Press.

Floridi, L. (2011). *The Philosophy of Information*. Oxford University Press.

Floridi, L. & Chiriatti, M. (2020). «GPT-3: Its Nature, Scope, Limits, and Consequences». *Minds and Machines* 30(4), 681–694.

Domingos, P. (2015). *The Master Algorithm: How the Quest for the Ultimate Learning Machine Will Remake Our World*. Basic Books.

Opere della serie

Salvador, S. *Il Go come laboratorio della mente. Giochi astratti, intelligenza artificiale ed epistemologia dell'expertise*. [Monografia I della serie]

Salvador, S. *La visione e la dimostrazione. Formalizzazione, intuizione matematica e limiti della comprensione*. [Monografia II della serie]